

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПУБЛИКАЦИЙ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДЗЗ И ГИС ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Э.А. Курбанов, С.А. Лежнин, О.Н. Воробьёв, С.А. Меньшиков, Д.М. Дергунов,
И. Ван, Л.В. Тарасова, Л.Н. Смирнова
Поволжский государственный технологический университет

В ближайшие годы прогнозируется усиление роли геопространственных данных и ДЗЗ в решении вопросов мониторинга окружающей среды, оценке растительного (лесного) покрова и предотвращения экологических бедствий. Понимание тенденций развития этих направлений в условиях меняющегося климата позволит совершенствовать подходы к устойчивому управлению лесами. Авторами проведён аналитический обзор научных статей, посвящённых использованию ДЗЗ и ГИС для оценки изменений наземного покрова на международном уровне в период между 2000 и 2020 гг. Рассмотренные исследования были сгруппированы по пяти направлениям: 1) проблема изменения климата и нарушения лесных экосистем; 2) мониторинг и оценка фрагментированности растительного (лесного) покрова; 3) урбанизация и городские леса (зелёная инфраструктура); 4) оценка глобальных и региональных запасов углерода; 5) оценка влияния на изменения наземного покрова комплекса различных факторов. Выявлено, что дистанционный мониторинг растительного (лесного) покрова в мире проводится в рамках международных программ во многих странах. В последние годы такие исследования широко практикуются в быстро развивающихся странах юго-восточной Азии, имеющих свою специфику управления природными ресурсами, соответствующие экологические проблемы и возможности валидации тематических карт наземными данными. Результаты исследования также показывают устойчивый рост точности и детальности разрабатываемых тематических карт на основе повышения пространственного разрешения спутниковых изображений и ГИС технологий. Это в свою очередь увеличивает точность прогнозов и моделей динамики растительного (лесного) покрова с учётом воздействия на него комплекса природных и антропогенных факторов. В заключение подчёркивается важность совершенствования и дальнейшего использования данных ДЗЗ и ГИС для решения глобальных и региональных задач в области мониторинга растительного (лесного) покрова.

Ключевые слова: ГИС, ДЗЗ, спутниковые изображения, лес, LUCS, изменение климата, российские и зарубежные исследования.

APPLICATIONS OF REMOTE SENSING AND GIS FOR ESTIMATION OF LAND USE / COVER CHANGE: A REVIEW

E.A. Kurbanov, S.A. Lezhnin, O.N. Vorobev, S.A. Menshikov, D.M. Dergunov,
Y. Wang, L.V. Tarasova, L.N. Smirnova
Volga State University of Technology

In the coming years, it is expected that the role of geospatial data and remote sensing will increase in resolving problems of monitoring of environment, estimation of the vegetation (forest) cover and preventing ecological disasters. Understanding the development trends of these areas in the conditions of climate change will increase approaches to sustainable forest management. The study provides an analytical review of research articles related to the use of remote sensing and GIS in the field of Land Use / Cover Change (LUCS) worldwide between 2000 and 2020. The research overview was grouped in five areas: 1) the problem of climate change and disturbance of forest ecosystems; 2) monitoring and assessment of fragmentation of vegetation (forest) cover; 3) urbanization and urban forests (green infrastructure); 4) estimation of global and regional carbon stocks; 5) assessment of the impact of various factors on the LUCS. The review reveals that remote sensing of vegetation (forest) cover in the world is carried out in many countries of the world within the framework of international programs. In recent years, such studies have been widely practiced in the rapidly developing countries of Southeast Asia, having their own specifics of nature management, environmental problems and the possibility of validating thematic maps with ground data. The overview also shows a stable increase in the accuracy and detail of the developed thematic maps based on the increased spatial resolution of satellite images and the use of GIS technologies. This, in turn, leads to the accuracy of predictions and models of the vegetation (forest) cover dynamics, taking into account the

impact of a complex of natural and anthropogenic factors. In conclusion, the importance of improving and further use of remote sensing and GIS data for solving global and regional problems in the field of monitoring of vegetation (forest) cover is emphasized.

Key words: *GIS, remote sensing, satellite images, forest, LUCC, climate change.*

Введение

Исследование проблем изменения землепользования и наземного покрова (LUCC – *англ.* Land Use / Cover Change), которое неизбежно происходит в связи с природными явлениями и хозяйственной деятельностью человека, в последние десятилетия проводится учёными во всём мире. Проект LUCC был запущен в 1994 году в рамках международной программы геосферы-биосферы (IGBP – *англ.* International Geosphere-Biosphere Programme), посвящённой феномену глобальных изменений во взаимодействии с человеческими системами (IGBP). После завершения программы IGBP в 2015 г. исследования в области LUCC продолжились в 2016 году в рамках программы «Глобальная земельная программа» После завершения программы IGBP в 2015 году исследования в области LUCC продолжились в 2016 году в рамках программы «Глобальная земельная программа» (GLP – *англ.* Global Land Programme) (Global land...). Считается, что LUCC оказывает значительное влияние на различные экологические, экономические и социальные процессы в мировом масштабе (Chen et al., 2020; Lai et al., 2016). Эти процессы приводят к вырубке лесных насаждений, деградации растительного покрова, стихийным бедствиям, утрате биоразнообразия, потере уникальных экосистем и нарушению глобального баланса атмосферного углерода (Pan et al., 2011; Cohen et al., 2016; Knott et al., 2019).

В российской научной литературе при оценках растительного покрова и динамики ландшафтов обычно используют такие понятия, как «наземный покров», «подстилающая поверхность», «ландшафтный покров» и т.п. (Черных и др., 2018). Для понимания (прогнозирования) тенденций и принятия решений по управлению LUCC требуются крупномасштабные периодические наблюдения за экономической деятельностью человека и состоянием растительного покрова на региональном и глобальном уровнях (Yang, Lo, 2002; Барталев и др., 2005; Li, Qu, 2018). Традиционные методы сбора данных (картографирование и наземная съёмка) для подобных задач являются трудозатратными, занимают много времени и требуют значительных средств. Поэтому для анализа геопространственных данных в области LUCC находят широкое применение изображения дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и технологии ГИС (геоинформационные системы), которые обеспечивают актуальное, своевременное и реалистичное представление наземного покрова (Лупян и др., 2011; Курбанов и др., 2014; Moulds et al., 2018). Эти технологии на сегодняшний день являются наиболее эффективными инструментами наблюдения за изменениями наземного покрова благодаря возможности быстрого и оперативного получения изображений в широком диапазоне электромагнитного спектра (Елсаков, 2012; Taubert et al., 2018; Im, 2020).

Исследования и разработки в области LUCC с применением данных ДЗЗ и ГИС выполняются во всём мире по различным тематическим направлениям. Значительная часть таких работ приходится на оценку и мониторинг растительного (лесного) покрова.

Целью работы является обзор научных исследований LUCC в области оценки растительного покрова с помощью ДЗЗ и ГИС технологий и выявление основных научно-практических направлений их применения при мониторинге лесов на региональном и национальном уровнях.

Материалы и методика исследований

В работе анализировались зарубежные и отечественные научные публикации по теме исследования за период с 2000 по 2020 год. Для поиска литературных источников на английском языке была использована международная наукометрическая база данных Scopus. Публикации на русском языке по тематике исследования были найдены в российской научной электронной библиотеке elibrary.ru. Для подборки публикаций использованы следующие ключевые слова: LUCC, forest (лес), GIS (ГИС) и remote sensing (дистанционное зондирование). Литературные источники, рассматриваемые в этом исследовании, включали опубликованные статьи, материалы конференций и главы книг.

Первоначально в базе данных Scopus было найдено 1127, а в российском сегменте 348 публикаций, имеющих отношение к рассматриваемой проблеме. Статьи, в названии, ключевых словах и аннотации которых не было условий поиска, в дальнейшем были удалены из списка. После уточнения подобранных статей, включённых в аналитический обзор и затрагивающих непосредственно тему LUCC и растительного (лесного) покрова, для анализа было оставлено 209 публикаций, из которых 32 были выявлены в российской базе данных elibrary. Ссылки на используемые источники включают 106 публикаций.

Результаты

Анализ литературных источников по теме использования ГИС и ДЗЗ для оценки LUCC позволил систематизировать существующие работы в несколько тематических направлений, которые за последние два десятилетия были актуальны для отечественных и зарубежных исследователей.

Исследование показало, что значительная часть работ в области LUCC связана с *проблемой изменения климата и нарушенности лесных экосистем*. Обобщение последних полученных результатов в этой области способствует развитию концепций устойчивого управления лесами и устойчивого развития (Cao et al., 2020). Характеристика взаимодействий ландшафта (растительного покрова) и изменения климата (например, влияния на местные и региональные климатические процессы, подходы к смягчению последствий изменения климата и адаптации) стала одной из главных задач ландшафтной экологии (Wu, 2013).

Влияние снижения площадей лесов на температуру атмосферы в значительной степени зависит от географической широты ландшафта (местности). В частности, было установлено, что вырубка лесов вызывает похолодание в высоких широтах из-за увеличения альбедо поверхности, в то время как прогнозируемое потепление в результате снижения суммарного испарения будет наблюдаться в регионах низких широт (Bonan, 2008; Tölle et al., 2017). Сведение лесов в средних широтах Европы не повлияло на летнюю температуру атмосферы, в то время как зимняя температура снизилась на 1,5 °C (Broucke et al., 2015). Геопространственные данные LUCC провинции Хэйлунцзян (КНР) за 1900-2010 гг. показали, что существует значительная корреляция между переводом лесных насаждений, общая площадь которых снизилась за исследуемый период на 28 %, под сельскохозяйственные угодья, и индексами экстремальных температур атмосферы (Zhang et al., 2017). Положительные корреляции также наблюдаются между уменьшением площади лесов этой провинции, более частым возникновением экстремально высоких температур и повышением максимального значения дневной минимальной температуры.

Результаты анализа LUCC в пойме долины Киломберо (Танзании) за период 1990-2016 гг. по снимкам Landsat и с использованием принятых глобальных коэффициентов стоимости и модифицированных локальных коэффициентов стоимости экосистемных услуг (ESV - ecosystem services values) показали снижение показателей ESV лесов, кустарников, водно-

болотных угодий и воды (Msofe et al., 2020). Это привело к общей потере 811,5 млн долларов США (26,6 %) в ESV за последние 26 лет при расчётах с модифицированным коэффициентом локального значения и до 3000,7 млн долларов США (42,3 %) при расчёте с использованием глобальных коэффициентов.

Для оценки мангровых лесов 10 стран юго-восточной Азии, которые уязвимы к процессам LUCC, был проведён корреляционный анализ между данными MODIS и динамикой площадей этих экосистем за 2000-2012 гг. Исследование показало, что 22,64 % общей вырубленной площади мангровых лесов было преобразовано под сельское хозяйство, 5,85 % – под аквакультуру, 0,69 % – под инфраструктуру, а 16,35% осталось под влиянием других сфер деятельности человека (Fauzi et al., 2019).

Исследование сукцессионной динамики бореальных лесов, режимов нарушений (пожары) и их реакции на изменение климата проведено на примере бассейна реки Юкон (США и Канада). Авторами была смоделирована настоящая (за 2000-2008 гг.) и прогнозируемая продуктивность (NDVI) в ненарушенных насаждениях на основе различных источников абиотических данных, а также созданы модели сплайновой регрессии и меняющегося климата. Результаты показали, что максимальная аномалия экосистемы наступает через 30-40 лет после пожара, а лиственные древостои обычно имеют более высокий этот показатель, чем хвойные (Wylie et al., 2014).

Считается, что изменение климата влияет на продуктивность и распространение лесных насаждений (Beck, Goetz, 2012). Тем не менее, степень и скорость этого воздействия на общую долгосрочную продуктивность бореальных лесов остаются неопределёнными. Прогнозируется, что лиственные породы бореального пояса более позитивно будут реагировать на изменение климата (Johnstone et al., 2010), чем бореальные хвойные породы, и, вероятно, их ареал станет распространяться в более теплом направлении (Wolken et al., 2011; Им и др., 2020; Зуев и др., 2019). В то же время отмечается, что уровень воздействия климатических изменений на растительный покров тундр Западной Сибири уже является критическим (Титкова, Виноградова, 2015). В лесостепной зоне Центрального Черноземья России доля нарушенных хвойных лесов выросла с 1985 по 2018 гг. в 9 раз, а в лиственных лесах доля нарушенных участков увеличилась незначительно (Терехин, 2020).

Непосредственное отношение к процессам LUCC имеют работы *по мониторингу и оценке фрагментированности растительного (лесного) покрова*. Фрагментация и деградация лесов, вызванные LUCC, могут иметь негативные влияния на экологические системы в пространственных масштабах (Sharma, Roy, 2007; Riutta et al., 2014). Группой учёных были идентифицированы примерно 130 миллионов фрагментов лесных насаждений в трёх тропических и субтропических регионах (Центральная Америка, Африка, Азия и Австралия), которые обладали приблизительно схожими размерами, периметрами и фрактальной структурой (Taubert et al., 2018) (рис. 1). Прогнозные модели данного исследования показывают, что в течение 50 лет дополнительная потеря леса приведёт к значительному увеличению общего количества фрагментированных участков леса, а также к уменьшению их размеров, и что эти последствия могут быть частично смягчены за счёт лесовозобновления и охраны лесов.

Индийскими учёными была получена динамика долгосрочных изменений лесного покрова и его пространственно-временной структуры на основе анализа набора топографических карт (1930-е гг.) и наборов спутниковых изображений Landsat MSS (1975 и 1985 гг.), IRS 1B LISS-I (1995 г.), IRS P6 AWiFS (2005 г.) и Resourcesat-2. Исследование показало, что за рассматриваемый период в горных восточных Гатах Индии наблюдается существенное снижение площади больших участков леса (Reddy et al., 2016). Общее количество участков леса в

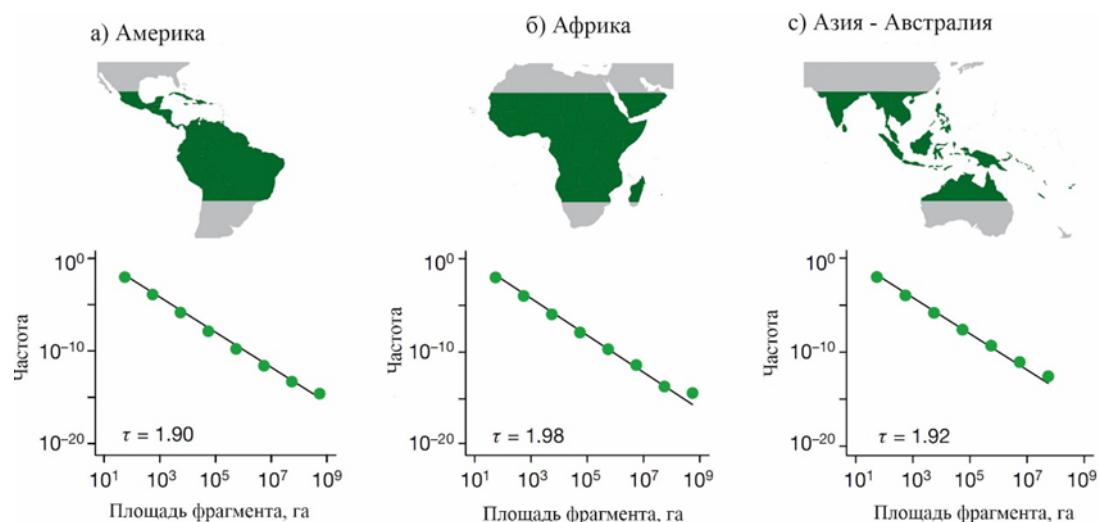


Рис. 1. Распределение фрагментов тропических и субтропических лесов в континентальном масштабе по площади: а) для Северной и Южной Америки ($n = 55,5$ млн фрагментов); б) Африки ($n = 44,8$ млн фрагментов); в) Азии и Австралии ($n = 30,5$ млн фрагментов). Сплошными линиями показаны аппроксимации степенных распределений с показателем τ . На картах приведена вся территория тропического пояса, а выбранные тропические регионы отмечены зелёным цветом (Taubert et al., 2018).

этом регионе увеличилось с 2688 (1930 г.) до 13009 (2013 г.). Самый большой участок леса в 1930 году имел площадь 41669 км², которая к 2013 году сократилась до 27800 км². Согласно пространственному анализу, наряду с вырубкой лесов свой вклад в фрагментированность лесов вносят сельское хозяйство, деградация кустарников и фруктовые плантации.

Подобные же результаты получены для гималайских лесов Индии, которые были подвержены антропогенной деятельности в связи с экономическим развитием (Lele et al., 2008; Chakraborty et al., 2017; Sahana et al., 2018). Исследователи при оценке фрагментации обычно используют статистические модели, описывающие пространственную взаимосвязь между вырубкой лесов и другими факторами в среде ГИС (Kumar et al., 2007; Wang et al., 2013). Для этого применяются различные модели: множественной линейной регрессии (Culas, 2007; Freitas et al., 2010), логистической регрессии (Echeverria et al., 2008) или географически взвешенной регрессии (Pineda et al., 2010).

Для характеристики процессов фрагментации растительного покрова исследователи также применяют модель фрагментации Рииттерса (Riitters et al., 2000), которая широко адаптирована для оценки лесов с использованием различных спутниковых карт лесного покрова на глобальном (Riitters et al., 2016; Wade et al., 2003), национальном (Li et al., 2011; Wickham et al., 2010; Yemshanov et al., 2015) и региональном уровнях (Dong et al., 2014). Модель основана на классификации лесного покрова на фрагментированные участки в зависимости от количества лесных пикселей (доля пикселей с лесом, окружённых пикселями, не относящимися к лесу) и лесных пикселей, расположенных внутри лесного массива. Эти типы фрагментированных участков классифицируются в соответствии со значениями P_f и P_{ff} ландшафте, окружающем этот пиксель. В результате классификации соответствующего участка

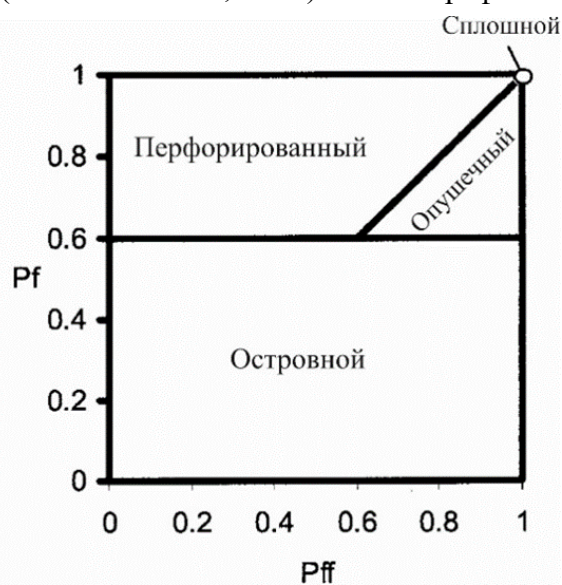


Рис. 2. Модель, используемая для характеристики компонентов фрагментации леса. P_f и P_{ff} характеризуют густоту и соседство (смежность, связанность) лесов для соответствующей площади ландшафта (Riitters et al., 2002)

спутникового снимка пикселям присваиваются четыре типа фрагментации: «сплошной» (англ. core), «перфорированный» или «лес с полянами» (perforated), «опушечный» (edge), «островной» (patch) (рис. 2).

Следующим направлением, которому посвящено много публикаций, является *оценка LUCC в связи с урбанизацией и городскими лесами (зелёная инфраструктура)*. Стремительная урбанизация в мире вызывает серьёзную тревогу, особенно в развивающихся странах, что вызвано в основном несанкционированной и незапланированной застройкой окраин городов (Farooq, Ahmad, 2008; Ghosh, 2019). Это также приводит к резкому изменению ландшафта и экологическим проблемам.

Для дешифрирования городских земель и выделения их от других классов наземного покрова китайскими учёными предлагаются различные индексы, такие как нормализованный разностный индекс непроницаемой поверхности (MNDISI – Normalized Difference Impervious Surface Index) (Liu et al., 2013), биофизический композиционный индекс (Biophysical Composition Index) (Deng, Wu, 2012), нормализованный разностный городской индекс (NDUI – Normalized Difference Urban Index) (Zhang et al., 2015), нормализованный разностный индекс застроенности (NDBI - Normalized Difference Built-up Index) (Zha et al., 2003; Статакис и др., 2012) и нормализованный разностный индекс открытых участков (NDBaI – Normalized Difference Bareness Index (Li, Chen, 2014). В частности, индекс MNDISI используется для классификации на снимках городских территорий по комбинированным данным температуры наземной поверхности Landsat и изображений высокого пространственного разрешения ночного освещения городов, получаемых с Международной космической станции (Liu et al., 2013). Для исследований в области LUCC городских территорий также находят применение ландшафтные показатели, на основе которых определяется индекс изменения ландшафта (Landscape change index). Этот индекс обычно используется для оценки изменений за разные периоды времени (Liu, Yang, 2015).

Среди многих полезных индексов, интерпретирующих взаимосвязь между LUCC городов и глобальным изменением климата, наиболее используемым является индекс «тепловой остров города» (UHI – Urban Heat Island), который тесно связан с качеством воздуха (Civerolo et al., 2007; Han et al., 2009; Cho, Choi, 2014), потреблением энергии (Kolokotroni et al., 2006; Santamouris et al., 2001) и риском для здоровья населения (Johnson et al., 2012; Rinner et al., 2010). Для оценки UHI успешное применение находят сканерные данные теплового инфракрасного канала (TIR – Thermal Infrared) с различным пространственным разрешением, включая AVHRR (8 км), MODIS (1 км), HJ-1 B (300 м), Landsat TM (120 м), ASTER (90 м) и Landsat ETM+ (60 м) благодаря их низкой стоимости и временному разрешению (Jusuf et al., 2007; Hao et al., 2016; Kitsara et al., 2018).

Chen и др. (2006) предложили оценивать взаимосвязь между UHI и LUCC по зависимости температуры от нормализованного разностного водного индекса (NDWI), NDBaI (для включения показателя открытых участков), нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) и нормализованного разностного индекса застроенности (NDBI). Было установлено, что при ограниченных значениях NDVI (<0) корреляции между индексами NDVI, NDWI, NDBaI и температурой отрицательны, в то время как между NDBI и температурой наблюдается положительная корреляция.

Китайскими учёными на основе временных рядов изображений спутников Landsat TM/ETM+ и демографических данных по городу Шанхай за 1997 и 2008 годы была проведена количественная оценка взаимосвязи между LUCC и миграцией населения и их влиянием на пространственно-временные модели UHI с использованием комплексного подхода ДЗЗ, ГИС и статистического анализа (Zhang et al. 2013). Результаты показали, что за исследуе-

мый период произошло расширение городской площади на 219,50 %, примерно 72,52 % из которых были в прошлом пахотными землями (24,79 %), залежами (21,21 %), лесными насаждениями и кустарниками (18,97 %), открытыми участками (6,62 %) и водоёмами (0,93 %). Такие изменения в LUCC и увеличение городского населения привели к значительным изменениям в пространственно-временных моделях UHI на территории Шанхая из-за потери водоёмов и покрытых растительностью земель (рис. 3).

Оценка LUCC с 1976 по 2003 годы была проведена в городской зоне Тирупати (Индия) с использованием топографической карты Survey of India 570/6 и ДЗЗ LISS III и PAN IRS ID 2003 г. (Mallupattu, Reddy, 2013). Сравнение LUCC за исследуемый период показывает, что наблюдается значительное увеличение площади городской застройки, городских лесов, плантаций и других земель.

Для другого индийского города Бхопал был проведён анализ LUCC за 1991-2016 годы по разновременным изображениям спутника Landsat (Ghosh, 2019). Результаты также свидетельствуют о том, что город пережил стремительное горизонтальное расширение. Площадь Бхопала увеличилась с 15,8 км² в 1991 году до 184,5 км² в 2016 году при средней скорости прироста 7 км² год⁻¹ с учётом пространственной диспропорции. Расширение застроенной площади в основном происходит за счёт сельскохозяйственных и лесных земель.

Для территории США была проведена оценка LUCC зелёной инфраструктуры на национальном уровне за период с 1992 по 2001 годы. Авторы предложили использовать морфологический пространственно-структурный анализ (morphological spatial pattern analysis) в качестве дополнительного способа составления тематической карты зелёной инфраструктуры по снимкам Landsat, расширения географического охвата и включения информации об LUCC (Wickham et al., 2010). В результате было идентифицировано более 100 хабов (большие площади растительности) и около 4000 крупных сетей (зелёные коридоры, соединяющие хабы) на территории США, из которых примерно 10 % пересекали границы штатов.

ДЗЗ и ГИС становятся основными инструментами *при оценках глобальных и региональных запасов углерода* в наземных экосистемах. Процессы LUCC, связанные с вырубкой и нарушениями в лесных насаждениях, вызывают эмиссию CO₂ и других парниковых газов, что вызывает широкое обсуждение в научном сообществе (Stocker et al., 2013; Nabuurs et al., 2013). В настоящее время имеются дан-

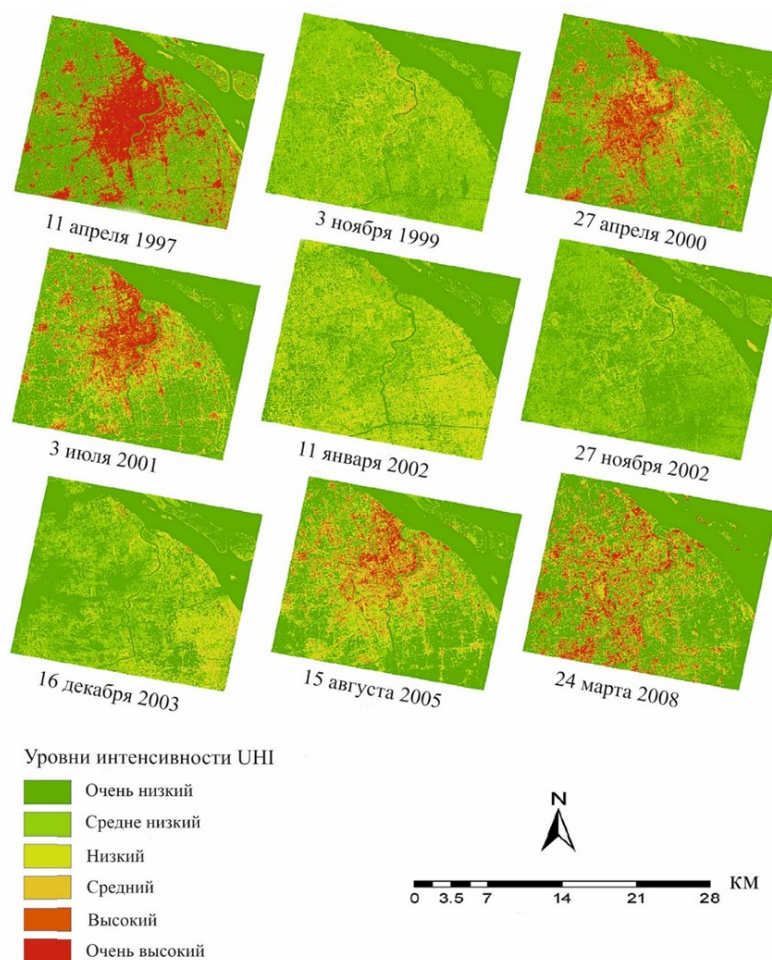


Рис. 3. Уровни интенсивности UHI (городской тепловой остров) г. Шанхай по разновременным спутниковым данным Landsat TM/ETM+ (H. Zhang et al., 2013)

ные о том, что в некоторых случаях фитомасса лесов в связи с изменением климата увеличивается, однако прямое или косвенное влияние экстремальных климатических явлений на этот процесс изучено недостаточно (Ruiz-Benito et al., 2014).

Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, принятое в 2015 году 195 странами, уделяет основное внимание ограничению повышения глобальной температуры до уровня менее 2 °C по сравнению с доиндустриальной эпохой (Парижские соглашения, 2015). Проблемы изменения климата заставили многие страны вернуться к вопросу инвентаризации национальных парниковых газов и запасов углерода в наземных экосистемах, в первую очередь в лесных насаждениях. Для этого страны участницы соглашения используют руководящие принципы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC), которые строго придерживаются требований мониторинга пула углерода в результате процессов LUCC (IPCC, 2006).

При ретроспективных оценках пространственно-временной динамики запасов углерода в фитомассе лесов обычно используют разновременные спутниковые изображения Landsat (Galidaki et al., 2017; Барталев и др., 2009; Potter, 2013) и MODIS (Lunetta et al., 2006; Pouliot et al., 2014). В течение последних трёх десятилетий были разработаны различные методы обнаружения изменений в растительном (лесном) покрове с использованием спутниковых изображений, включая постклассификационное сравнение (post-classification comparison), дифференциацию изображений, анализ главных компонентов (PCA – principal component analysis) и дифференцирование различных индексов растительности (Khatami et al., 2016; Lu et al., 2004; Nery et al., 2019). Общее повышение точности классификации карт LUCC представляет практический интерес с точки зрения их потенциального использования для моделирования изменений землепользования (Manandhar et al., 2009).

Для определения динамики фитомассы и связанных с LUCC потерь углерода лесными насаждениями в Национальном парке Маргаллах-Хиллз (Пакистан) были использованы мультиспектральные спутниковые изображения Landsat за 1990, 2000, 2010, 2017 годы и данные полевой инвентаризации, полученные путём случайной выборки данных по лесам за исследуемый период времени (Mannan et al., 2018). Исследование показало, что в результате LUCC за 27-летний период в атмосферу было эмитировано 154 ГгС (5,70 ГгС год⁻¹), что связано с антропогенными нарушениями древостоев в парке.

В последние десятилетия в Китае произошли существенные изменения в LUCC, которые во многом обусловлены его беспрецедентным экономическим развитием. Для анализа соответствующих изменений в депонировании С растительностью и почвой в период с 1990 по 2010 год были использованы разновременные данные Landsat (Lai et al., 2016). Результаты демонстрируют значительное сокращение площадей пастбищ (-6,85 %; $20,83 \times 10^6$ га) и увеличение площадей городов (+ 43,73 %; $6,87 \times 10^6$ га), сельхоз угодий (+ 0,84 %; $1,48 \times 10^6$ га) и лесов (+0,67 %; $1,52 \times 10^6$ га). Общий запас почвенного органического углерода сокращался примерно на 11,5 млн т С год⁻¹, тогда как в пуле биомассы депонировалось 13,2 млн т С год⁻¹. Большие потери углерода (примерно 101,8 млн т С год⁻¹) являются результатом неэффективного землепользования, включая лесные пожары и другие нарушения.

Для китайской провинции Чжэцзян проведён пространственно-временной анализ и выявлены закономерности выбросов углерода в период 1970-1990 и 1990-2010 гг., вызванных LUCC (Zhu et al., 2019). При исследовании были использованы цифровые карты землепользования провинции и спутниковые данные Landsat MSS/TM/ETM+. Результаты исследования показали последовательное сокращение площадей сельскохозяйственных угодий ($2,8 \times 10^5$ га или - 9,15 % и $5,9 \times 10^5$ га или - 20,49 %) и пастбищ ($3,4 \times 10^4$ га или -10,73 % и $1,5 \times 10^5$ га или - 54,1 %), а также устойчивое увеличение площади лесов ($2,0 \times 10^4$ га или 0,33 %

и $1,7 \times 10^5$ га или 2,81%) и городской застройки ($2,07 \times 10^5$ га или 78,41% и $6,49 \times 10^5$ га или 137,8%) (рис. 4). В провинции Чжэцзян с 1970 по 1990 год произошло сокращение примерно 8,3 млн т общего запаса углерода, включая в растительности на 0,4 млн т и органике почв на 7,9 млн. т. В то же время с 1990 по 2010 год произошло сокращение примерно 17,5 млн т накопленного С, что представляет собой баланс 2,8 млн т депонированного углерода растительностью и его снижение на 20,3 млн т С в почве.

Карта наземной биомассы (AGB - aboveground biomass) за 2008-2010 гг. была получена с разрешением 30 м для бореальных лесов в бассейне реки Юкон на Аляске с использованием данных Landsat и наземных измерений (Ji et al., 2015). Для этого авторами была разработана модель множественной регрессии, включающая полевые данные AGB, показатели спектральной яркости растительного покрова по изображениям Landsat и индексы растительности. При оценке региональной наземной плотности углерода (AGB) субальпийских лесов с умеренным климатом на северо-западе Китая были интегрированы данные лидарной съёмки и изображений Landsat (Du et al., 2015). Разработанная модель для крупномасштабных оценок объяснила 76 % дисперсии AGB лесов при систематической ошибке $27,9 \text{ т С га}^{-1}$. Для оценки и картирования запасов углерода в подзолах Амазонки также была применена комбинация изображений ДЗЗ (Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), Landsat 8 и полевые данные, что позволило точно выделить и классифицировать разные группы растительности с различным гидрологическим режимом почв (Pereira et al., 2015).

Испанские учёные использовали временные ряды изображений Landsat (1984-2009 гг.) для оценки изменений в биомассе лесов с преобладанием сосны центральной части Испании (Gómez et al., 2012). Для выявления изменений на уровне ландшафта и распределения лесов использовались методы объектно-ориентированного анализа. Результаты свидетельствуют, что общая площадь соснового леса за исследуемый 25-летний период увеличилась на 40 % – с 1211 км^2 до 1698 км^2 . Следуя логике процессов накопления углерода, наши результаты показывают, что это также ведёт к увеличению депонированных запасов углерода.

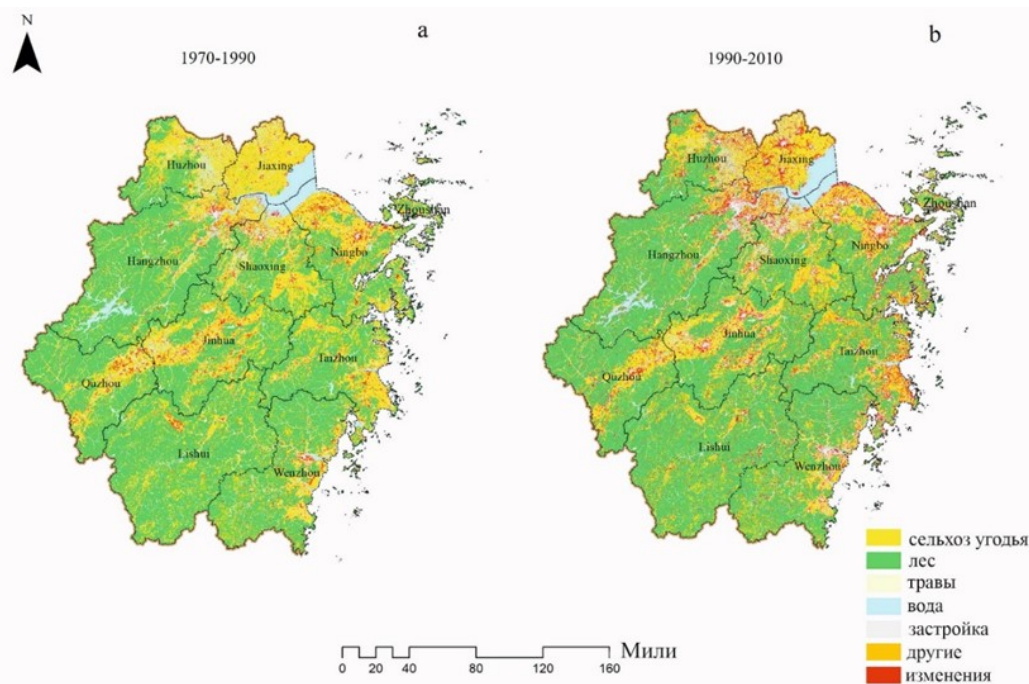


Рис. 4. Пространственное распределение LUCC в Чжэцзяне: а) с 1970 по 1990 г. и б) с 1990 по 2010 г. Красным цветом показаны площади, преобразованные в другой тип землепользования.

Ещё одним распространённым типом исследований является *оценка влияния на LUCC комплекса различных факторов*, имеющих внешние (востребованность на международ-

ных рынках, политика в области окружающей среды, международные соглашения и т.п.) или внутренние причины (рост населения, развитие инфраструктуры, рост экономики) (Bürgi et al., 2005). При использовании в этих исследованиях анализа «обнаружения изменений» ДЗЗ и ГИС способствуют включению таких важных факторов, как высота над уровнем моря, населённые пункты, удаленность от дорог и расстояние от рек (Nurda et al., 2020; Zhang et al., 2019). В большинстве таких случаев LUCC имеет отношение к вырубке лесов или переводу земель под другие виды пользования (Acheson, McCloskey, 2008).

На основании изображений Landsat (с 1979 по 2010 гг.) исследованы физические и социально-экономические факторы, влияющие на тенденции LUCC (лесные насаждения) в центральной Аргентине (Hoyos et al., 2018). Для этого была разработана ГИС с тематическими картами, показывающими различные движущие силы этих процессов, и проведён анализ РСА. Основной тенденцией сокращения площадей лесных насаждений в этом регионе явился перевод земель в сельское хозяйство.

Для национального уровня Индии разработана модель LUCC, основанная на данных инвентаризации всех её штатов и спутниковых изображений высокого разрешения за период с 1960 по 2010 год (Moulds et al., 2018). Пространственно-временная динамика LUCC с 1986 по 2014 год в бассейне верхнего течения реки Телис-Пирис (Бразильской Амазонии), проведённая на основе управляемой классификации изображений сенсоров ТМ (Thematic Mapper) Landsat 5 и TIRS (Thermal Infrared Sensor), показала наибольшие различия за период исследования для тематических классов «сельскохозяйственные угодья» и «тропический лес» (Zaiatz et al., 2018). На основе тематической классификации изображений Landsat за 1997, 2004 и 2011 годы методом «естественных границ» (natural breaks classification) были проанализированы LUCC и экологическая уязвимость региона Яньань (провинция Шэньси, КНР), придерживающегося политики возврата сельхозугодий в лесной фонд. В сочетании с данными о землепользовании, социально-экономическими показателями и состоянием природных ресурсов экологическая уязвимость территории Яньань оценивается с использованием модели пространственного анализа главных компонент (SPCA) (Hou et al., 2016).

Ретроспективный анализ динамики LUCC и её причин, проведённый с использованием спутниковых изображений Landsat 5 ТМ 1984, Landsat 5 ТМ 1999 и Landsat 8 ТМ 2015 для бассейна реки Бересса (Эфиопия), показал небольшое приращение площадей лесных насаждений с 1999 по 2015 год со скоростью $7,1 \text{ га год}^{-1}$, что в свою очередь связано с вовлечением местных сообществ в посадку деревьев вокруг усадеб и сельскохозяйственных ферм (Meshesha et al., 2016). Оценка динамики LUCC в Бенине с использованием карт CCI-LC (англ. Climate change initiative land cover) Европейского космического агентства (ESA) за 2001, 2008 и 2013 годы в программе QGIS позволили спрогнозировать на 2025 и 2037 годы темпы увеличения посевных площадей и лесов, а также значительное сокращение площади земель саванны (Guidigan et al., 2019). Классификация разновременных спутниковых изображений серии Landsat и метод «обнаружения изменений» (англ. change detection) использовались для картирования LUCC региона Замбези (Намибия) за период в двадцать шесть лет, разделённых на три этапа (1984-1991, 1991-2000 и 2000-2010). Исследование показало, что на процессы изменений лесного покрова в этом регионе влияют четыре пространственно-временных фактора: расстояние до ближайшей дороги, расстояние до населённых пунктов, плотность населения и сроки между пожарами (Kamwi et al., 2018).

Учёные из Иордании оценили пространственную динамику LUCC в бассейне реки Ярмук (Иордания) за 22 года (1987-2009) методами обнаружения изменений и по данным NDVI. Результаты анализа выявили радикальные изменения в снижении площадей лесов: на 14 % под сельскохозяйственные угодья и 2 % под городскую застройку (Obeidat et al., 2019). Исследование динамики LUCC с 1992 по 2018 год также показало уменьшение площадей

лесного покрова на территории северных Гималаев Кашмира (Индия) за счёт роста населения и экономического роста, расширения площадей под застройку поселений и садоводство (Fayaz et al., 2020).

По данным Landsat, Средиземноморские леса района Джабаль Ахдар (Ливия) потеряли за 32 года (1985-2017) в результате LUCC 39 % своей площади, при этом самый высокий процент сведения лесов наблюдался в период 2010-2017 гг (Alawamy et al., 2020). В Израиле на основе индекса NDVI, полученного по 14-летним временным рядам MODIS между 2000 и 2014 гг., установлено влияние на LUCC двух основных факторов - расширение сельскохозяйственных угодий и городов (Levin, 2016). Рост населения, урбанизация и расширение пахотных земель явились главными причинами сокращения лесных земель на 25 % в бассейне реки Аваш (Австралия) по данным спутниковых изображений Landsat с 1988 по 2018 гг. (Tadese et al., 2020). В Среднем Поволжье России за период 2001-2014 гг. по 5 основным классам наземного покрова тематических карт Landsat наблюдается снижение площади класса «лес» на 2,7 %, увеличение класса «кустарниково-древесной растительности» и класса «не покрытого растительностью» на 0,6 % (Курбанов и др., 2016). Существенное сокращение лесного покрова на 41 % с 1925 по 2012 год также наблюдалось в районе Идукки (округ в индийском штате Керала), что было вызвано затоплением земель в результате строительства гидроэлектростанции и вырубкой лесов (Ramachandran, Reddy, 2017).

Заключение и выводы

Анализ литературных источников показал высокий исследовательский интерес к проблеме LUCC и использованию технологий ДЗЗ и ГИС для решения задач по оценке динамики растительного покрова во всём мире. Основная часть научных публикаций по рассматриваемой тематике была найдена в англоязычных журналах, индексируемых в международной наукометрической базе данных Scopus.

Большинство российских научных коллективов проводят оценки динамики растительного (лесного) покрова в различных регионах страны методами ДЗЗ и ГИС без привязки к международным программам IGBP и GLP. Основанием для таких исследований в российских публикациях обычно служат федеральные целевые и государственные программы: «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», «Развитие науки и технологий на 2013-2020 годы», «Научно-технологическое развитие Российской Федерации».

При оценках LUCC учёными используется широкий спектр методических подходов, доступных спутниковых изображений и геопространственных моделей. Исследования также имеют разную направленность, в связи с этим мы выделили пять, на наш взгляд, имеющих непосредственное отношение к динамике растительного (лесного) покрова и экологическим проблемам современного мира. К таким направлениям исследований в области оценки LUCC нами были отнесены: 1) проблема изменения климата и нарушенности лесных экосистем; 2) мониторинг и оценка фрагментированности растительного (лесного) покрова; 3) урбанизация и городские леса (зелёная инфраструктура); 4) оценка глобальных и региональных запасов углерода; 5) оценка влияния на LUCC комплекса различных факторов.

Проведённый анализ литературных данных с начала 2000-х годов показывает устойчивый рост детальности исследований по тематике LUCC в связи с увеличением доступных для широкого круга пользователей геопространственных данных (спутники, БПЛА) и их разрешения.

В целом комплексное использование геопространственных данных с различным геопространственным и временным разрешением для мониторинга лесного покрова будет способ-

ствовать успешному решению вопросов устойчивого развития и снижению экологических рисков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-55-80010\19

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

Библиографический список

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 203-221.
2. Барталев С.А., Ховратович Т.С., Елсаков В.В. Использование спутниковых изображений для оценки потерь углерода лесными экосистемами в результате вырубок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2, № 6. С. 343-351.
3. Елсаков В.В. Спутниковая съёмка в оценке продуктивности экосистем Европейского Севера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 1. С. 71-79.
4. Зуев В.В., Короткова Е.М., Павлинский А.В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры западной Сибири в 1982-2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66-76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019666-76>
5. Им С.Т., Харук В.И., Ли В.Г. Миграция северной границы вечнозелёных хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 176-187. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-176-187
6. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А., Демишева Е.Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Лес. Экология. Природопользование». 2014. № 1(21). С. 18-32.
7. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 1. С. 36-48.
8. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 190-198.
9. Парижское соглашение. ООН, 2015, 30 с. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
10. Статакис Д., Перакис К., Савин И.Ю. Дешифрирование урбанизированных территорий по спутниковым данным Landsat // Исследование земли из космоса. 2012. № 5. С. 22-29.
11. Терехин Э.А. Изменение нарушенности лесных экосистем лесостепной зоны Центрального Черноземья в конце XX – начале XXI века // Исследование Земли из космоса. 2020. № 3. С. 26-37. DOI: 10.31857/S0205961420030069
12. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 75-86.
13. Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Першин Д.К. Пространственно-временная динамика ландшафтов водосборных бассейнов Алтайского региона в последние 40 лет // География и природные ресурсы. 2018. № 3. С. 104-115 [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(104-115\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(104-115))
14. Acheson J.M., McCloskey J. Causes of deforestation: The Maine case // Human Ecology. 2008. Vol. 36. P. 909-922. <https://doi.org/10.1007/s10745-008-9204-3>
15. Alawamy J.S., Balasundram S.K., Hanif A.H.M., Sung C.T.B. Detecting and Analyzing Land Use and Land Cover Changes in the Region of Al-Jabal Al-Akhdar, Libya Using Time-Series Landsat Data from 1985 to 2017 // Sustainability (Switzerland). 2020. Vol. 12(11). 4490 <https://doi.org/10.3390/su12114490>
16. Beck P.S.A., Goetz S. J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: Ecological variability and regional differences // Environmental Research Letters. 2011. 6, 045501 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/029501>
17. Broucke S.V., Luyssert S., Davin E.L., Janssens I., van Lipzig N. New insights in the capability of climate models to simulate the impact of LUC based on temperature decomposition of paired site observations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2015. Vol. 120, № 11. P. 5417-5436. <https://doi.org/10.1002/2015JD023095>
18. Bürgi M., Hersperger A.M., Schneeberger N. Driving forces of landscape change - Current and new directions// Landscape Ecology. 2005, Vol. 19, № 8. P. 857-868. <https://doi.org/10.1007/s10980-004-0245-8>
19. Cao Q., Liu Y., Georgescu M., Wu J. Impacts of landscape changes on local and regional climate: a systematic review // Landscape Ecology. 2020. Vol. 35, № 6. P. 1269-1290. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01015-7>

20. Chakraborty A., Ghosh A., Sachdeva K., Joshi, P.K. Characterizing fragmentation trends of the Himalayan forests in the Kumaon region of Uttarakhand, India // *Ecological Informatics*. 2017. 38. P. 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.12.006>
21. Chen C., He X., Liu Z., Sun W., Dong H., Chu Y. Analysis of regional economic development based on land use and land cover change information derived from Landsat imagery // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10 № 1, P. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69716-2>
22. Cho H. S., Choi M. J. Effects of compact Urban development on air pollution: Empirical evidence from Korea // *Sustainability* (Switzerland). 2014. Vol. 6, № 9. P. 5968–5982. <https://doi.org/10.3390/su6095968>
23. Civerolo K., Hogrefe C., Lynn B., Rosenthal J., Ku J.Y., Solecki W., et al. Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region // *Atmospheric Environment*. 2007. Vol. 41, № 9. P. 1803–1818. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.076>
24. Cohen W. B., Yang Z., Stehman S.V., Schroeder T.A., Bell D.M., Masek J.G. et al. Forest disturbance across the conterminous United States from 1985–2012: The emerging dominance of forest decline // *Forest Ecology and Management*. 2016. 360. P. 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.042>
25. Culas R.J. Deforestation and the environmental Kuznets curve: An institutional perspective // *Ecological Economics*. 2007. 61(2–3). P. 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.03.014>
26. Deng C., Wu C. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments // *Remote Sensing of Environment*. 2012. 127. 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.009>
27. Dong J., Xiao X., Sheldon S., Biradar C., Zhang G., Duong N.D., et al. A 50-m forest cover map in Southeast Asia from ALOS/PALSAR and its application on forest fragmentation assessment. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, № 1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085801>
28. Du J., He Z., Chen L., Yang J., Zhu X., Zhao W. Integrating lidar with Landsat data for subalpine temperate forest aboveground carbon estimation // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36, № 23. P. 5767–5789. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101651>
29. Echeverria C., Coomes D. A., Hall M., Newton, A.C. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile // *Ecological Modelling*. 2008. Vol. 212(3–4). P. 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.10.045>
30. FAO. The State of the World's Forests 2018 – Forest pathways to sustainable development. Rome, 2018. 118 p.
31. Farooq S., Ahmad S. Urban sprawl development around Aligarh city: A study aided by satellite remote sensing and GIS // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2008. Vol. 36, № 1. P. 77–88. <https://doi.org/10.1007/s12524-008-0008-0>
32. Fauzi A., Sakti A., Yayusman L., Harto A., Prasetyo L., Irawan B., Kamal M., Wikantika K. Contextualizing mangrove forest deforestation in southeast Asia using environmental and socio-economic data products // *Forests*. 2019. Vol. 10, № 11. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10110952>
33. Fayaz A., Shafiq M., Singh H., Ahmed P. Assessment of spatiotemporal changes in land use/land cover of North Kashmir Himalayas from 1992 to 2018 // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2020. Vol. 6, № 2. P. 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00750-9>
34. Freitas S.R., Hawbaker T.J., Metzger J.P. Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest // *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259, № 3. P. 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.036>
35. Galidaki G., Zianis D., Gitas I., Radoglou K., Karathanassi V., Tsakiri-Strati M., et al. Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol. 38, № 7. P. 1940–1966. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1266113>
36. Ghosh S. A city growth and land-use/land-cover change: a case study of Bhopal, India // *Modeling Earth Systems and Environment*. 2019. Vol. 5, № 4. P. 1569–1578. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00605-y>
37. Global Land Programme (accessed 16.11.2020) <https://glp.earth/>
38. Gómez C., Wulder M.A., White J.C., Montes F., Delgado J.A. Characterizing 25 years of change in the area, distribution, and carbon stock of Mediterranean pines in Central Spain // *International Journal of Remote Sensing*. 2012. Vol. 33, № 17. P. 5546–5573. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.663115>
39. Guidigan M.L.G., Sanou C.L., Ragatoa D.S., Fafa C.O., Mishra V.N. Assessing Land Use/Land Cover Dynamic and Its Impact in Benin Republic Using Land Change Model and CCI-LC Products // *Earth Systems and Environment*. 2019. 3(1). P. 127–137. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0083-5>
40. Han S., Bian H., Tie X., Xie Y., Sun M., Liu A. Impact of nocturnal planetary boundary layer on urban air pollutants: Measurements from a 250-m tower over Tianjin, China // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 162, № 1. P. 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.056>
41. Hao P., Niu Z., Zhan Y., Wu Y., Wang L., Liu, Y. Spatiotemporal changes of urban impervious surface area and land surface temperature in Beijing from 1990 to 2014 // *GIScience and Remote Sensing*. 2016. Vol. 53, № 1. P. 63–84. <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1095471>
42. Hou K., Li X., Wang J.J., Zhang J. An analysis of the impact on land use and ecological vulnerability of the policy of returning farmland to forest in Yan'an, China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. 23. P. 4670–4680. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5679-9>
43. Hoyos L.E., Cabido M.R., Cingolani A.M. A multivariate approach to study drivers of land-cover changes through remote sensing in the dry Chaco of Argentina // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2018. 7(5), P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijgi7050170>
44. IGBP. Land use and Cover Change (accessed 16.11.2020) <http://www.igbp.net/researchprojects/igbpcoreprojectsphaseone/landuseandcoverchange.4.1b8ac20512db692f2a680009062.html>

45. Im J. Earth observations and geographic information science for sustainable development goals // *GIScience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 57, № 5. P. 591–592. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1763041>
46. Ji L., Wylie B.K., Brown D.R.N., Peterson B., Alexander H.D., Mack M.C., et al. Spatially explicit estimation of aboveground boreal forest biomass in the Yukon River Basin, Alaska // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36, № 4. P. 939–953. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1004764>
47. Johnson D.P., Stanforth A., Lulla V., Lubert G. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data // *Applied Geography*. 2012. Vol. 35 (1–2). P. 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.04.006>
48. Jusuf S.K., Wong N.H., Hagen E., Anggoro R., Hong Y. The influence of land use on the urban heat island in Singapore // *Habitat International*. 2007. Vol. 31(2). P. 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.02.006>
49. Kamwi J.M., Cho M.A., Kaetsch C., Manda S.O., Graz F.P., Chirwa P.W. Assessing the spatial drivers of land use and land cover change in the protected and communal areas of the Zambezi Region, Namibia // *Land*. 2018. 7(4). <https://doi.org/10.3390/land7040131>
50. Khatami R., Mountrakis G., Stehman S.V. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research // *Remote Sensing of Environment*. 2016. 177. P. 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>
51. Kitsara G., Papaioannou G., Retalis A., Paronis D., Kerkides P. Estimation of air temperature and reference evapotranspiration using MODIS land surface temperature over Greece // *International Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 39, № 3. P. 924–948. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395965>
52. Knott J.A., Desprez, J.M., Oswalt, C.M., Fei S. Shifts in forest composition in the eastern United States // *Forest Ecology and Management*. 2019. Vol. 433. P. 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.061>
53. Kolokotroni M., Giannitsaris I., Watkins R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies // *Solar Energy*. 2006. Vol. 80, № 4. P. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.010>
54. Kumar A., Uniyal S.K., Lal B. Stratification of forest density and its validation by NDVI analysis in a part of western Himalaya, India using Remote sensing and GIS techniques // *International Journal of Remote Sensing*, 2007. Vol. 28, № 11. P. 2485–2495. <https://doi.org/10.1080/01431160600693583>
55. Lai L., Huang X., Yang H., Chuai X., Zhang M., Zhong T., et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 // *Science Advances*. 2016. 2(11). P. 1–9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601063>
56. Lele N., Joshi P.K., Agrawal S.P. Assessing forest fragmentation in northeastern region (NER) of India using landscape matrices // *Ecological Indicators*. 2008. Vol. 8, № 5. P. 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.10.002>
57. Levin N. Human factors explain the majority of MODIS-derived trends in vegetation cover in Israel: a densely populated country in the eastern Mediterranean // *Regional Environmental Change*. 2016. Vol. 16, № 4. P. 1197–1211. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0848-4>
58. Li M., Zhu Z., Vogelmann J.E., Xu D., Wen W., Liu A. Characterizing fragmentation of the collective forests in southern China from multitemporal Landsat imagery: A case study from Kecheng district of Zhejiang province // *Applied Geography*. 2011. Vol. 31, № 3. P. 1026–1035. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.02.004>
59. Li S., Chen X. A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using landsat 8 data // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2014. Vol. 40, № 4. P. 139–144. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-139-2014>
60. Li X., Qu Y. Evaluation of Vegetation Responses to Climatic Factors and Global Vegetation Trends using GLASS LAI from 1982 to 2010 // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 44, № 4. P. 357–372. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1526064>
61. Liu C., Shao Z., Chen M., Luo H. MNDISI: A multi-source composition index for impervious surface area estimation at the individual city scale // *Remote Sensing Letters*. 2013. Vol. 4, № 8. P. 803–812. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.798710>
62. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques // *International Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25, № 12/ P. 2365–2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
63. Lunetta R.S., Knight J.F., Ediriwickrema J., Lyon J.G., Worthy L.D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 105, № 2. P. 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.018>
64. Manandhar R., Odeh I.O.A., Ancev T. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement // *Remote Sensing*. 2009, Vol. 1, № 3. P. 330–344. <https://doi.org/10.3390/rs1030330>
65. Mannan A., Feng Z., Ahmad A., Liu J., Saeed S., Mukete B. Carbon dynamic shifts with land use change in margallah hills national park, Islamabad (Pakistan) from 1990 to 2017 // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2018. Vol. 16, № 3. P. 3197–3214. https://doi.org/10.15666/aecer/1603_31973214
66. Meshesha T.W., Tripathi S.K., Khare D. Analyses of land use and land cover change dynamics using GIS and remote sensing during 1984 and 2015 in the Beressa Watershed Northern Central Highland of Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016. 2(4). P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0233-4>
67. Moulds S., Buytaert W., Mijic A. Data Descriptor: A spatio-temporal land use and land cover reconstruction for India from 1960–2010 // *Scientific Data*. 2018. Vol. 5. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.159>
68. Msofe N.K., Sheng L., Li Z., Lyimo J. Impact of land use/cover change on ecosystem service values in the Kilombero valley floodplain, southeastern Tanzania // *Forests*. 2020. Vol. 11, № 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/f11010109>

69. Nabuurs G.J., Lindner M., Verkerk P.J., Gunia K., Deda P., Michalak R., Grassi, G. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass // *Nature Climate Change*. 2013. Vol. 3, № 9. P. 792–796. <https://doi.org/10.1038/nclimate1853>
70. Nery T., Sadler R., Solis A.M., White B., Polyakov M. Discriminating native and plantation forests in a Landsat time-series for land use policy design // *International Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 40, № 11. P. 4059–4082. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1558375>
71. Nurda N., Noguchi R., Ahamed T. Change detection and land suitability analysis for extension of potential forest areas in Indonesia using satellite remote sensing and GIS // *Forests*. 2020. Vol. 11, № 4. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/F11040398>
72. Obeidat M., Awawdeh M., Lababneh A. Assessment of land use/land cover change and its environmental impacts using remote sensing and GIS techniques, Yarmouk River Basin, north Jordan // *Arabian Journal of Geosciences*. 2019. Vol. 12, № 22. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4905-z>
73. Pan Y., Birdsall R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. Vol. 333, № 6045. P. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
74. Pereira O.J.R., Montes C.R., Lucas Y., Santin R.C., Melfi A.J. A multi-sensor approach for mapping plant-derived carbon storage in Amazonian podzols // *International Journal of Remote Sensing*. 2015. Vol. 36, № 8. P. 2076–2092. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1034896>
75. Pineda J.N.B., Bosque S.J., Gómez D.M., Franco P.R. Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression // *Applied Geography*. 2010. Vol. 30, № 4. P. 576–591. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.004>
76. Potter C. Ten Years of Vegetation Change in Northern California Marshlands Detected Using Landsat Satellite Image Analysis // *Journal of Water Resource and Protection*. 2013. Vol. 5, № 5. P. 485–494. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.55048>
77. Pouliot D., Latifovic R., Zabcic N., Guindon L., Olthof I. Development and assessment of a 250m spatial resolution MODIS annual land cover time series (2000–2011) for the forest region of Canada derived from change-based updating // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. P. 731–743. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.004>
78. Ramachandran R.M., Reddy C. S. Monitoring of deforestation and land use changes (1925–2012) in Idukki district, Kerala, India using remote sensing and GIS // *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2017. Vol. 45, № 1. P. 163–170. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0521-x>
79. Reddy C.S., Satish K.V., Pasha S.V., Jha C.S., Dadhwal V.K. Assessment and monitoring of deforestation and land-use changes (1976–2014) in Andaman and Nicobar Islands, India using remote sensing and GIS // *Current Science*. 2016. Vol. 111, № 9. P. 1492–1499. <https://doi.org/10.18520/cs/v111/i9/1492-1499>
80. Riitters K., Wickham J., Costanza J.K., Vogt P. A global evaluation of forest interior area dynamics using tree cover data from 2000 to 2012 // *Landscape Ecology*. 2016. Vol. 31. P. 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0270-9>
81. Riitters K., Wickham J., O'Neill R.O., Jones B., Smith E. Global-Scale Patterns of Forest Fragmentation // *Conservation Ecology*. 2000. Vol. 4, № 2. <https://www.jstor.org/stable/26271763>
82. Riitters K.H., Wickham J.D., O'Neill R.V., Jones, K.B., Smith E.R., Coulston J.W., et al. Fragmentation of Continental United Forests // *Ecosystems*. 2002. Vol. 5, № 8. P. 815–822.
83. Rinner C., Patychuk D., Bassil K., Nasr S., Gower S., Campbell M. The role of maps in neighborhood-level heat vulnerability assessment for the city of Toronto // *Cartography and Geographic Information Science*. 2010. Vol. 37, № 1. P. 31–44. <https://doi.org/10.1559/152304010790588089>
84. Riutta T., Slade E.M., Morecroft M.D., Bebbler D.P., Malhi Y. Living on the edge: Quantifying the structure of a fragmented forest landscape in England // *Landscape Ecology*. 2014. Vol. 29, № 6. P. 949–961. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0025-z>
85. Ruiz-Benito P., Gómez-Aparicio L., Paquette A., Messier C., Kattge J., Zavala M.A. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests // *Global Ecology and Biogeography*. 2014. Vol. 23, № 3. P. 311–322. <https://doi.org/10.1111/geb.12126>
86. Sahana M., Hong H., Sajjad H., Liu J., Zhu A.X. Assessing deforestation susceptibility to forest ecosystem in Rudrapur district, India using fragmentation approach and frequency ratio model // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 627. P. 1264–1275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.290>
87. Santamouris M., Papanikolaou N., Livada I., Koronakis I., Georgakis C., Argiriou A., Assimakopoulos D.N. On the impact of urban climate on the energy consumption of building // *Solar Energy*. 2001. Vol. 70, № 3. P. 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5)
88. Sharma S., Roy P.S. Forest fragmentation in the Himalaya: A Central Himalayan case study // *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. 2007. Vol. 14, № 2. P. 201–210. <https://doi.org/10.1080/13504500709469720>
89. Tadese M., Kumar L., Koech R., Kogo B.K. Mapping of land-use/land-cover changes and its dynamics in Awash River Basin using remote sensing and GIS // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2020. Vol. 19, № 100352 <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100352>
90. Taubert F., Fischer R., Groeneveld J., Lehmann S., Müller M. S., Rödig E., et al. Global patterns of tropical forest fragmentation // *Nature*. 2018. Vol. 554, № 7693. P. 519–522. <https://doi.org/10.1038/nature25508>
91. Tölle M.H., Engler S., Panitz H.J. Impact of abrupt land cover changes by tropical deforestation on Southeast Asian climate and agriculture // *Journal of Climate*. 2017. Vol. 30, № 7. P. 2587–2600. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0131.1>
92. Wade T.G., Riitters K.H., Wickham J.D., Jones K.B. Distribution and causes of global forest fragmentation // *Ecology and Society*. 2003. Vol. 7, № 2. <https://doi.org/10.5751/es-00530-070207>

93. Wang N., Brown D.G., An L., Yang S., Ligmann-Zielinska A. Comparative performance of logistic regression and survival analysis for detecting spatial predictors of land-use change // *International Journal of Geographical Information Science*. 2013. Vol. 27, № 10. P. 1960–1982. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.779377>
94. Wickham J.D., Riitters K.H., Wade T.G., Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing // *Landscape and Urban Planning*. 2010. Vol. 94 (3–4). P. 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.10.003>
95. Wolken J.M., Hollingsworth T.N., Rupp T.S., Chapin F.S., Trainor S.F., Barrett T.M., et al. Evidence and implications of recent and projected climate change in Alaska's forest ecosystems // *Ecosphere*. 2011. Vol. 2, № 11. <https://doi.org/10.1890/ES11-00288.1>
96. Wu J. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop // *Landscape Ecology*. 2013. Vol. 28, № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9836-y>
97. Wylie B., Rigge M., Brisco B., Murnaghan K., Rover J., Long J. Effects of disturbance and climate change on ecosystem performance in the Yukon River basin boreal forest // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6, № 10. P. 9145–9169. <https://doi.org/10.3390/rs6109145>
98. Yang X., Lo C.P. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23, № 9. P. 1775–1798. <https://doi.org/10.1080/01431160110075802>
99. Yemshanov D., Koch F.H., Riitters K.H., Mcconkey B., Huffman T., Smith S. Assessing land clearing potential in the Canadian agriculture-forestry interface with a multi-attribute frontier approach // *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 54. P. 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.019>
100. Zaiatz A.P.S.R., Zolin C.A., Vendrusculo L.G., Lopes T.R., Paulino J. Agricultural land use and cover change in the Cerrado/Amazon ecotone: A case study of the upper Teles Pires river basin // *Acta Amazonica*. 2018. Vol. 48, № 2. P. 168–177. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201701930>
101. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24, № 3. P. 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
102. Zhang C., Wang X., Liu Y. Changes in quantity, quality, and pattern of farmland in a rapidly developing region of China: a case study of the Ningbo region // *Landscape and Ecological Engineering*. 2019. Vol. 15, № 3. P. 323–336. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00382-x>
103. Zhang H., Qi, Z. fang, Ye X. yue, Cai Y. bin, Ma W. chun, Chen M. nan. Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China // *Applied Geography*. 2013. Vol. 44. P. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.021>
104. Zhang L., Pan T., Zhang H., Li X., Jiang L. The effects of forest area changes on extreme temperature indexes between the 1900s and 2010s in Heilongjiang Province, China // *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, № 12. <https://doi.org/10.3390/rs9121280>
105. Zhang Q., Li B., Thau D., Moore R. Building a better Urban picture: Combining day and night remote sensing imagery // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, № 9. P. 11887–11913. <https://doi.org/10.3390/rs70911887>
106. Zhu E., Deng J., Zhou M., Gan M., Jiang R., Wang K., Shahtahmassebi A.R. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China // *Science of the Total Environment*, 2019. Vol. 646. P. 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.317>

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A. Sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov sputnikovogo kartografirovaniya rastitel'nogo pokrova Rossii [State and prospects for the development of methods of satellite mapping of vegetation cover in Russia], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2015**, T. 12, № 5, P. 203–221.
2. Bartalev S.A., Khovratovich T.S., Elsakov V.V. Ispol'zovanie sputnikovykh izobrazhenii dlya otsenki poter' ugleroda lesnymi ekosistemami v rezul'tate vyrubok [Using satellite imagery to estimate carbon loss in forest ecosystems from deforestation], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2009**, Vol. 2, № 6, P. 343–351.
3. Elsakov V.V. Sputnikovaya s"emka v otsenke produktivnosti ekosistem Evropeiskogo Severa [Satellite imagery in assessing the productivity of ecosystems in the European North], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2012**, Vol. 9, № 1. P. 71–79.
4. Zuev V.V., Korotkova E.M., Pavlinskii A.V. Klimaticheski obuslovlennyye izmeneniya rastitel'nogo pokrova taigi i tundry zapadnoi Sibiri v 1982–2015 gg. po dannym sputnikovykh nablyudenii [Climatically caused changes in the vegetation cover of taiga and tundra in western Siberia in 1982–2015 according to satellite observations], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **2019**, № 6, P. 66–76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019666-76>
5. Im S.T., Kharuk V.I., Li V.G. Migratsiya severnoi granitsy vечнозеленых хвойных древостоев в Сибири в XXI столетии [Migration of the northern border of evergreen coniferous stands in Siberia in the XXI century], *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2020**, Vol. 17, № 1, P. 176–187. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-176-187
6. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N. Chetyre desyatiletia issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Four decades of forest research from Landsat imagery], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie»*, **2014**, № 1(21), P. 18–32.

7. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A. Otsenka tochnosti i sopostavimosti tematicheskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya [Assessment of the accuracy and comparability of thematic maps of forest cover of different spatial resolution on the example of the Middle Volga region], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2016**, Vol. 13, № 1, P. 36–48.
8. Lupyan E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E. Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti («Vega») [Vegetation condition monitoring service ("Vega")], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2011**, Vol. 8, № 1, P. 190–198.
9. Parizhskoe soglasenie. OON [Paris Agreement. UN], **2015**, 30 p. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
10. Statakis D., Perakis K., Savin I.Yu. Deshifirovanie urbanizirovannykh territorii po sputnikovym dannym Landsat [Deciphering urban areas using satellite data Landsat], *Issledovanie zemli iz kosmosa*, **2012**, № 5, P. 22–29.
11. Terekhin E.A. Izmenenie narushennosti lesnykh ekosistem lesostepnoi zony Tsentral'nogo Chernozem'ya v kontse XX – nachale XXI veka [Changes in the disturbance of forest ecosystems in the forest-steppe zone of the Central Chernozem region at the end of the XX – beginning of the XXI century], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, **2020**, № 3, P. 26–37. DOI: 10.31857/S0205961420030069
12. Titkova T.B., Vinogradova V.V. Otklik rastitel'nosti na izmenenie klimaticheskikh uslovii v boreal'nykh i subarkticheskikh landshaftakh v nachale XXI veka [Vegetation response to changes in climatic conditions in boreal and subarctic landscapes at the beginning of the XXI century], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **2015**, Vol. 12, № 3, P. 75–86.
13. Chernykh D.V., Biryukov R.Yu., Zolotov D.V., Pershin D.K. Prostranstvenno-vremennaya dinamika landshaftov vodosbornykh basseinov Altaiskogo regiona v poslednie 40 let [Spatial-temporal dynamics of the landscapes of the drainage basins of the Altai region in the last 40 years], *Geografiya i prirodnye resursy*, **2018**, № 3, P. 104–115 [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(104-115\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(104-115))
14. Acheson J.M., McCloskey J. Causes of deforestation: The Maine case, *Human Ecology*, **2008**, Vol. 36, P. 909–922. <https://doi.org/10.1007/s10745-008-9204-3>
15. Alawamy J.S., Balasundram S.K., Hanif A.H.M., Sung C.T.B. Detecting and Analyzing Land Use and Land Cover Changes in the Region of Al-Jabal Al-Akhdar, Libya Using Time-Series Landsat Data from 1985 to 2017, *Sustainability (Switzerland)*, **2020**, Vol. 12(11), 4490 <https://doi.org/10.3390/su12114490>
16. Beck P.S.A., Goetz S. J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: Ecological variability and regional differences, *Environmental Research Letters*, **2011**, 6, 045501 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/029501>
17. Broucke S.V., Luyssert S., Davin E.L., Janssens I., van Lipzig N. New insights in the capability of climate models to simulate the impact of LUC based on temperature decomposition of paired site observations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **2015**, Vol. 120, № 11, P. 5417–5436. <https://doi.org/10.1002/2015JD023095>
18. Bürgi M., Hersperger A.M., Schneeberger N. Driving forces of landscape change - Current and new directions, *Landscape Ecology*, **2005**, Vol. 19, № 8, P. 857–868. <https://doi.org/10.1007/s10980-004-0245-8>
19. Cao Q., Liu Y., Georgescu M., Wu J. Impacts of landscape changes on local and regional climate: a systematic review, *Landscape Ecology*, **2020**, Vol. 35, № 6, P. 1269–1290. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01015-7>
20. Chakraborty A., Ghosh A., Sachdeva K., Joshi, P.K. Characterizing fragmentation trends of the Himalayan forests in the Kumaon region of Uttarakhand, India, *Ecological Informatics*, **2017**, 38, P. 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.12.006>
21. Chen C., He X., Liu Z., Sun W., Dong H., Chu Y. Analysis of regional economic development based on land use and land cover change information derived from Landsat imagery, *Scientific Reports*, **2020**, Vol. 10, № 1, P. 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69716-2>
22. Cho H. S., Choi M. J. Effects of compact Urban development on air pollution: Empirical evidence from Korea, *Sustainability (Switzerland)*, **2014**, Vol. 6, № 9, P. 5968–5982. <https://doi.org/10.3390/su6095968>
23. Civerolo K., Hogrefe C., Lynn B., Rosenthal J., Ku J.Y., Solecki W., et al. Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region, *Atmospheric Environment*, **2007**, Vol. 41, № 9, P. 1803–1818. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.076>
24. Cohen W. B., Yang Z., Stehman S.V., Schroeder T.A., Bell D.M., Masek J.G. et al. Forest disturbance across the conterminous United States from 1985–2012: The emerging dominance of forest decline, *Forest Ecology and Management*, **2016**, 360, P. 242–252. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.042>
25. Culas R.J. Deforestation and the environmental Kuznets curve: An institutional perspective, *Ecological Economics*, **2007**, 61(2–3), P. 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.03.014>
26. Deng C., Wu C. BCI: A biophysical composition index for remote sensing of urban environments, *Remote Sensing of Environment*, **2012**, 127, 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.009>
27. Dong J., Xiao X., Sheldon S., Biradar C., Zhang G., Duong N.D., et al. A 50-m forest cover map in Southeast Asia from ALOS/PALSAR and its application on forest fragmentation assessment, *PLoS ONE*, **2014**, Vol. 9, № 1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085801>
28. Du J., He Z., Chen L., Yang J., Zhu X., Zhao W. Integrating lidar with Landsat data for subalpine temperate forest aboveground carbon estimation, *International Journal of Remote Sensing*, **2015**, Vol. 36, № 23, P. 5767–5789. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1101651>
29. Echeverria C., Coomes D. A., Hall M., Newton, A.C. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile, *Ecological Modelling*, **2008**, Vol. 212(3–4), P. 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.10.045>

30. FAO. The State of the World's Forests 2018 – Forest pathways to sustainable development. Rome, **2018**. 118 p.
31. Farooq S., Ahmad S. Urban sprawl development around Aligarh city: A study aided by satellite remote sensing and GIS, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **2008**, Vol. 36, № 1, P. 77–88. <https://doi.org/10.1007/s12524-008-0008-0>
32. Fauzi A., Sakti A., Yayusman L., Harto A., Prasetyo L., Irawan B., Kamal M., Wikantika K. Contextualizing mangrove forest deforestation in southeast Asia using environmental and socio-economic data products, *Forests*, **2019**, Vol. 10, № 11, P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10110952>
33. Fayaz A., Shafiq M., Singh H., Ahmed P. Assessment of spatiotemporal changes in land use/land cover of North Kashmir Himalayas from 1992 to 2018, *Modeling Earth Systems and Environment*, **2020**, Vol. 6, № 2, P. 1189–1200. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00750-9>
34. Freitas S.R., Hawbaker T.J., Metzger J.P. Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest, *Forest Ecology and Management*, **2010**, Vol. 259, № 3, P. 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.10.036>
35. Galidaki G., Zianis D., Gitas I., Radoglou K., Karathanassi V., Tsakiri-Strati M., et al. Vegetation biomass estimation with remote sensing: focus on forest and other wooded land over the Mediterranean ecosystem, *International Journal of Remote Sensing*, **2017**, Vol. 38, № 7, P. 1940–1966. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1266113>
36. Ghosh S. A city growth and land-use/land-cover change: a case study of Bhopal, India, *Modeling Earth Systems and Environment*, **2019**, Vol. 5, № 4, P. 1569–1578. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00605-y>
37. Global Land Programme (accessed 16.11.2020) <https://glp.earth/>
38. Gómez C., Wulder M.A., White J.C., Montes F., Delgado J.A. Characterizing 25 years of change in the area, distribution, and carbon stock of Mediterranean pines in Central Spain, *International Journal of Remote Sensing*, **2012**, Vol. 33, № 17, P. 5546–5573. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.663115>
39. Guidigan M.L.G., Sanou C.L., Ragatoa D.S., Fafa C.O., Mishra V.N. Assessing Land Use/Land Cover Dynamic and Its Impact in Benin Republic Using Land Change Model and CCI-LC Products, *Earth Systems and Environment*, **2019**, 3(1), P. 127–137. <https://doi.org/10.1007/s41748-018-0083-5>
40. Han S., Bian H., Tie X., Xie Y., Sun M., Liu A. Impact of nocturnal planetary boundary layer on urban air pollutants: Measurements from a 250-m tower over Tianjin, China, *Journal of Hazardous Materials*, **2009**, Vol. 162, № 1, P. 264–269. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.056>
41. Hao P., Niu Z., Zhan Y., Wu Y., Wang L., Liu, Y. Spatiotemporal changes of urban impervious surface area and land surface temperature in Beijing from 1990 to 2014, *GIScience and Remote Sensing*, **2016**, Vol. 53, № 1, P. 63–84. <https://doi.org/10.1080/15481603.2015.1095471>
42. Hou K., Li X., Wang J.J., Zhang J. An analysis of the impact on land use and ecological vulnerability of the policy of returning farmland to forest in Yan'an, China, *Environmental Science and Pollution Research*, **2016**, 23, P. 4670–4680. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5679-9>
43. Hoyos L.E., Cabido M.R., Cingolani A.M. A multivariate approach to study drivers of land-cover changes through remote sensing in the dry Chaco of Argentina, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **2018**, 7(5), P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijgi7050170>
44. IGBP. Land use and Cover Change (accessed 16.11.2020) <http://www.igbp.net/researchprojects/igbpcoreprojectsphaseone/landuseandcoverchange.4.1b8ae20512db692f2a680009062.html>
45. Im J. Earth observations and geographic information science for sustainable development goals, *GIScience and Remote Sensing*, **2020**, Vol. 57, № 5, P. 591–592. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1763041>
46. Ji L., Wylie B.K., Brown D.R.N., Peterson B., Alexander H.D., Mack M.C., et al. Spatially explicit estimation of aboveground boreal forest biomass in the Yukon River Basin, Alaska, *International Journal of Remote Sensing*, **2015**, Vol. 36, № 4, P. 939–953. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1004764>
47. Johnson D.P., Stanforth A., Lulla V., Lubner G. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data, *Applied Geography*, **2012**, Vol. 35 (1–2), P. 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.04.006>
48. Jusuf S.K., Wong N.H., Hagen E., Anggoro R., Hong Y. The influence of land use on the urban heat island in Singapore, *Habitat International*, **2007**, Vol. 31(2), P. 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2007.02.006>
49. Kamwi J.M., Cho M.A., Kaetsch C., Manda S.O., Graz F.P., Chirwa P.W. Assessing the spatial drivers of land use and land cover change in the protected and communal areas of the Zambezi Region, Namibia, *Land*, **2018**, 7(4), <https://doi.org/10.3390/land7040131>
50. Khatami R., Mountrakis G., Stehman S.V. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research, *Remote Sensing of Environment*, **2016**, 177, P. 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>
51. Kitsara G., Papaioannou G., Retalis A., Paronis D., Kerkides P. Estimation of air temperature and reference evapotranspiration using MODIS land surface temperature over Greece, *International Journal of Remote Sensing*, **2018**, Vol. 39, № 3, P. 924–948. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1395965>
52. Knott J.A., Desprez, J.M., Oswalt, C.M., Fei S. Shifts in forest composition in the eastern United States, *Forest Ecology and Management*, **2019**, Vol. 433, P. 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.061>
53. Kolokotroni M., Giannitsaris I., Watkins R. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies, *Solar Energy*, **2006**, Vol. 80, № 4, P. 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.03.010>
54. Kumar A., Uniyal S.K., Lal B. Stratification of forest density and its validation by NDVI analysis in a part of western Himalaya, India using Remote sensing and GIS techniques, *International Journal of Remote Sensing*, **2007**, Vol. 28, № 11, P. 2485–2495. <https://doi.org/10.1080/01431160600693583>

55. Lai L., Huang X., Yang H., Chuai X., Zhang M., Zhong T., et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010, *Science Advances*, **2016**, 2(11), P. 1–9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601063>
56. Lele N., Joshi P.K., Agrawal S.P. Assessing forest fragmentation in northeastern region (NER) of India using landscape matrices, *Ecological Indicators*, **2008**, Vol. 8, № 5, P. 657–663. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.10.002>
57. Levin N. Human factors explain the majority of MODIS-derived trends in vegetation cover in Israel: a densely populated country in the eastern Mediterranean, *Regional Environmental Change*, **2016**, Vol. 16, № 4, P. 1197–1211. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0848-4>
58. Li M., Zhu Z., Vogelmann J.E., Xu D., Wen W., Liu A. Characterizing fragmentation of the collective forests in southern China from multitemporal Landsat imagery: A case study from Kecheng district of Zhejiang province, *Applied Geography*, **2011**, Vol. 31, № 3, P. 1026–1035. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.02.004>
59. Li S., Chen X. A new bare-soil index for rapid mapping developing areas using landsat 8 data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, **2014**, Vol. 40, № 4, P. 139–144. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-139-2014>
60. Li X., Qu Y. Evaluation of Vegetation Responses to Climatic Factors and Global Vegetation Trends using GLASS LAI from 1982 to 2010, *Canadian Journal of Remote Sensing*, **2018**, Vol. 44, № 4, P. 357–372. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1526064>
61. Liu C., Shao Z., Chen M., Luo H. MNDISI: A multi-source composition index for impervious surface area estimation at the individual city scale, *Remote Sensing Letters*, **2013**, Vol. 4, № 8, P. 803–812. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.798710>
62. Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E. Change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, **2004**, Vol. 25, № 12, P. 2365–2401. <https://doi.org/10.1080/0143116031000139863>
63. Lunetta R.S., Knight J.F., Ediriwickrema J., Lyon J.G., Worthy L.D. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data, *Remote Sensing of Environment*, **2006**, Vol. 105, № 2, P. 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.06.018>
64. Manandhar R., Odeh I.O.A., Ancev T. Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data using post-classification enhancement, *Remote Sensing*, **2009**, Vol. 1, № 3, P. 330–344. <https://doi.org/10.3390/rs1030330>
65. Mannan A., Feng Z., Ahmad A., Liu J., Saeed S., Mukete B. Carbon dynamic shifts with land use change in margallah hills national park, Islamabad (Pakistan) from 1990 to 2017, *Applied Ecology and Environmental Research*, **2018**, Vol. 16, № 3, P. 3197–3214. https://doi.org/10.15666/aecer/1603_31973214
66. Meshesha T.W., Tripathi S.K., Khare D. Analyses of land use and land cover change dynamics using GIS and remote sensing during 1984 and 2015 in the Beressa Watershed Northern Central Highland of Ethiopia, *Modeling Earth Systems and Environment*, **2016**, 2(4), P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0233-4>
67. Moulds S., Buytaert W., Mijic A. Data Descriptor: A spatio-temporal land use and land cover reconstruction for India from 1960–2010, *Scientific Data*, **2018**, Vol. 5, P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.159>
68. Msofe N.K., Sheng L., Li Z., Lyimo J. Impact of land use/cover change on ecosystem service values in the Kilombero valley floodplain, southeastern Tanzania, *Forests*, **2020**, Vol. 11, № 1, P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/f11010109>
69. Nabuurs G.J., Lindner M., Verkerk P.J., Gunia K., Deda P., Michalak R., Grassi, G. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass, *Nature Climate Change*, **2013**, Vol. 3, № 9, P. 792–796. <https://doi.org/10.1038/nclimate1853>
70. Nery T., Sadler R., Solis A.M., White B., Polyakov M. Discriminating native and plantation forests in a Landsat time-series for land use policy design, *International Journal of Remote Sensing*, **2019**, Vol. 40, № 11, P. 4059–4082. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1558375>
71. Nurda N., Noguchi R., Ahamed T. Change detection and land suitability analysis for extension of potential forest areas in Indonesia using satellite remote sensing and GIS, *Forests*, **2020**, Vol. 11, № 4, P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/f11040398>
72. Obeidat M., Awawdeh M., Lababneh A. Assessment of land use/land cover change and its environmental impacts using remote sensing and GIS techniques, Yarmouk River Basin, north Jordan, *Arabian Journal of Geosciences*, **2019**, Vol. 12, № 22, <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4905-z>
73. Pan Y., Birdsall R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests, *Science*, **2011**, Vol. 333, № 6045, P. 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
74. Pereira O.J.R., Montes C.R., Lucas Y., Santin R.C., Melfi A.J. A multi-sensor approach for mapping plant-derived carbon storage in Amazonian podzols, *International Journal of Remote Sensing*, **2015**, Vol. 36, № 8, P. 2076–2092. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1034896>
75. Pineda J.N.B., Bosque S.J., Gómez D.M., Franco P.R. Exploring the driving forces behind deforestation in the state of Mexico (Mexico) using geographically weighted regression, *Applied Geography*, **2010**, Vol. 30, № 4, P. 576–591. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.05.004>
76. Potter C. Ten Years of Vegetation Change in Northern California Marshlands Detected Using Landsat Satellite Image Analysis, *Journal of Water Resource and Protection*, **2013**, Vol. 5, № 5, P. 485–494. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.55048>
77. Pouliot D., Latifovic R., Zabcic N., Guindon L., Olthof I. Development and assessment of a 250m spatial resolution MODIS annual land cover time series (2000–2011) for the forest region of Canada derived from change-based updating, *Remote Sensing of Environment*, **2014**, Vol. 140, P. 731–743. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.004>

78. Ramachandran R.M., Reddy C. S. Monitoring of deforestation and land use changes (1925–2012) in Idukki district, Kerala, India using remote sensing and GIS, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **2017**, Vol. 45, № 1, P. 163–170. <https://doi.org/10.1007/s12524-015-0521-x>
79. Reddy C.S., Satish K.V., Pasha S.V., Jha C.S., Dadhwal V.K. Assessment and monitoring of deforestation and land-use changes (1976–2014) in Andaman and Nicobar Islands, India using remote sensing and GIS, *Current Science*, **2016**, Vol. 111, № 9, P. 1492–1499. <https://doi.org/10.18520/cs/v111/i9/1492-1499>
80. Riitters K., Wickham J., Costanza J.K., Vogt P. A global evaluation of forest interior area dynamics using tree cover data from 2000 to 2012, *Landscape Ecology*, **2016**, Vol. 31, P. 137–148. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0270-9>
81. Riitters K., Wickham J., O'Neill R.O., Jones B., Smith E. Global-Scale Patterns of Forest Fragmentation, *Conservation Ecology*, **2000**, Vol. 4, № 2, <https://www.jstor.org/stable/26271763>
82. Riitters K.H., Wickham J.D., O'Neill R.V., Jones, K.B., Smith E.R., Coulston J.W., et al. Fragmentation of Continental United Forests, *Ecosystems*, **2002**, Vol. 5, № 8, P. 815–822.
83. Rinner C., Patychuk D., Bassil K., Nasr S., Gower S., Campbell M. The role of maps in neighborhood-level heat vulnerability assessment for the city of Toronto, *Cartography and Geographic Information Science*, **2010**, Vol. 37, № 1, P. 31–44. <https://doi.org/10.1559/152304010790588089>
84. Riutta T., Slade E.M., Morecroft M.D., Bebbler D.P., Malhi Y. Living on the edge: Quantifying the structure of a fragmented forest landscape in England, *Landscape Ecology*, **2014**, Vol. 29, № 6, P. 949–961. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0025-z>
85. Ruiz-Benito P., Gómez-Aparicio L., Paquette A., Messier C., Kattge J., Zavala M.A. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests, *Global Ecology and Biogeography*, **2014**, Vol. 23, № 3, P. 311–322. <https://doi.org/10.1111/geb.12126>
86. Sahana M., Hong H., Sajjad H., Liu J., Zhu A.X. Assessing deforestation susceptibility to forest ecosystem in Rudrapur district, India using fragmentation approach and frequency ratio model, *Science of the Total Environment*, **2018**, Vol. 627, P. 1264–1275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.290>
87. Santamouris M., Papanikolaou N., Livada I., Koronakis I., Georgakis C., Argiriou A., Assimakopoulos D.N. On the impact of urban climate on the energy consumption of building, *Solar Energy*, **2001**, Vol. 70, № 3, P. 201–216. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00095-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5)
88. Sharma S., Roy P.S. Forest fragmentation in the Himalaya: A Central Himalayan case study, *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, **2007**, Vol. 14, № 2, P. 201–210. <https://doi.org/10.1080/13504500709469720>
89. Tadese M., Kumar L., Koech R., Kogo B.K. Mapping of land-use/land-cover changes and its dynamics in Awash River Basin using remote sensing and GIS, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **2020**, Vol. 19, № 100352 <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100352>
90. Taubert F., Fischer R., Groeneveld J., Lehmann S., Müller M. S., Rödig E., et al. Global patterns of tropical forest fragmentation, *Nature*, **2018**, Vol. 554, № 7693, P. 519–522. <https://doi.org/10.1038/nature25508>
91. Tölle M.H., Engler S., Panitz H.J. Impact of abrupt land cover changes by tropical deforestation on Southeast Asian climate and agriculture, *Journal of Climate*, **2017**, Vol. 30, № 7, P. 2587–2600. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0131.1>
92. Wade T.G., Riitters K.H., Wickham J.D., Jones K.B. Distribution and causes of global forest fragmentation, *Ecology and Society*, **2003**, Vol. 7, № 2, <https://doi.org/10.5751/es-00530-070207>
93. Wang N., Brown D.G., An L., Yang S., Ligmann-Zielinska A. Comparative performance of logistic regression and survival analysis for detecting spatial predictors of land-use change, *International Journal of Geographical Information Science*, **2013**, Vol. 27, № 10, P. 1960–1982. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.779377>
94. Wickham J.D., Riitters K.H., Wade T.G., Vogt P. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing, *Landscape and Urban Planning*, **2010**, Vol. 94 (3–4), P. 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.10.003>
95. Wolken J.M., Hollingsworth T.N., Rupp T.S., Chapin F.S., Trainor S.F., Barrett T.M., et al. Evidence and implications of recent and projected climate change in Alaska's forest ecosystems, *Ecosphere*, **2011**, Vol. 2, № 11, <https://doi.org/10.1890/ES11-00288.1>
96. Wu J. Key concepts and research topics in landscape ecology revisited: 30 years after the Allerton Park workshop, *Landscape Ecology*, **2013**, Vol. 28, № 1, P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9836-y>
97. Wylie B., Rigge M., Brisco B., Murnaghan K., Rover J., Long J. Effects of disturbance and climate change on ecosystem performance in the Yukon River basin boreal forest, *Remote Sensing*, **2014**, Vol. 6, № 10, P. 9145–9169. <https://doi.org/10.3390/rs6109145>
98. Yang X., Lo C.P. Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area, *International Journal of Remote Sensing*, **2002**, Vol. 23, № 9, P. 1775–1798. <https://doi.org/10.1080/01431160110075802>
99. Yemshanov D., Koch F.H., Riitters K.H., McConkey B., Huffman T., Smith S. Assessing land clearing potential in the Canadian agriculture-forestry interface with a multi-attribute frontier approach, *Ecological Indicators*, **2015**, Vol. 54, P. 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.019>
100. Zaiatz A.P.S.R., Zolin C.A., Vendrusculo L.G., Lopes T.R., Paulino J. Agricultural land use and cover change in the Cerrado/Amazon ecotone: A case study of the upper Teles Pires river basin, *Acta Amazonica*, **2018**, Vol. 48, № 2, P. 168–177. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201701930>

101. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *International Journal of Remote Sensing*, **2003**, Vol. 24, № 3, P. 583–594, <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
102. Zhang C., Wang X., Liu Y. Changes in quantity, quality, and pattern of farmland in a rapidly developing region of China: a case study of the Ningbo region, *Landscape and Ecological Engineering*, **2019**, Vol. 15, № 3, P. 323–336. <https://doi.org/10.1007/s11355-019-00382-x>
103. Zhang H., Qi, Z. fang, Ye X. yue, Cai Y. bin, Ma W. chun, Chen M. nan. Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China, *Applied Geography*, **2013**, Vol. 44, P. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.021>
104. Zhang L., Pan T., Zhang H., Li X., Jiang L. The effects of forest area changes on extreme temperature indexes between the 1900s and 2010s in Heilongjiang Province, China, *Remote Sensing*, **2017**, Vol. 9, № 12, <https://doi.org/10.3390/rs9121280>
105. Zhang Q., Li B., Thau D., Moore R. Building a better Urban picture: Combining day and night remote sensing imagery, *Remote Sensing*, **2015**, Vol. 7, № 9, P. 11887–11913. <https://doi.org/10.3390/rs70911887>
106. Zhu E., Deng J., Zhou M., Gan M., Jiang R., Wang K., Shahtahmassebi A.R. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China, *Science of the Total Environment*, **2019**, Vol. 646, P. 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.317>