

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ

А. К. Попова

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, Иркутск

Прогнозирование структуры и состояния лесов в будущем помогает увидеть влияние климатических и антропогенных факторов на лесной ландшафт. Наличие достаточно точных прогнозов позволяет формировать стратегии управления лесами, которые помогут обеспечить устойчивость ресурса при минимальных негативных последствиях. При этом точность таких прогнозов сильно зависит от качества исходных данных. Наземное обследование леса для сбора данных о породах и возрасте деревьев требует времени и материальных затрат, которые возрастают с увеличением площади исследуемой территории. В работе описан подход сбора начальных данных для инициализации моделей лесных ресурсов из открытых источников. Предложено использовать наборы данных, составленные на основе спутниковых изображений. Информация о породах деревьев получена из набора GLC_FCS30 – глобальной классификации типов земной поверхности с разрешением 30 м, набор классов которой позволил выделить хвойные и лиственные группы пород, а также лиственницы. Возраст деревьев был определен по связи биомассы дерева с его возрастом, заданной в таблицах нормативно-справочных материалов. Значения биомассы взяты из набора ESA Biomass, составленного по результатам совмещения радарных и лидарных спутниковых съемок в единый растровый продукт с разрешением 100 м. Для получения итогового массива для инициализации модели были наложены друг на друга карты классификации и биомассы, каждому значению биомассы сопоставлен возраст в зависимости от породы дерева. Готовый породно-возрастной состав был поделен на участки в соответствии с картой кварталов лесничества и подан на вход модели LANDIS-II. Было проведено моделирование динамики леса на 100 лет, составлены прогнозные карты распределения средних возрастов деревьев.

Ключевые слова: модели лесных ландшафтов, моделирование динамики лесов, данные ДЗЗ, спутниковые снимки, биомасса лесов, классификация пород деревьев.

USE OF SATELLITE DATA TO INITIALIZE FOREST RESOURCE DYNAMICS MODELS

A. K. Popova

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS, Irkutsk

Forecasting the structure and condition of forests in the future helps to see the impact of climatic and anthropogenic factors on the forest landscape. The availability of sufficiently accurate forecasts allows the formation of forest management strategies that will help ensure the sustainability of the resource with minimal negative consequences. The accuracy of such forecasts strongly depends on the quality of the input data. Ground-based forest surveys to collect data on tree species and age require time and material costs, which increase with the size of the study area. The paper describes an approach to initial data collection for the initialization of forest resource models from open sources. We propose to use datasets compiled based on

satellite images. Information on tree species was obtained from the GLC_FCS30 set, a global classification of land surface types with a resolution of 30 m, whose set of classes made it possible to identify coniferous and deciduous groups of species, as well as larch. The age of trees was determined from the relationship between tree biomass and tree age given in the reference material tables. Biomass values were taken from the ESA Biomass set, compiled from the results of combining radar and lidar satellite imagery into a single raster product at 100 m resolution. To get the final array for model initialization, classification and biomass maps were overlaid, and each biomass value was age-matched to a tree species. The finished species-age composition was divided into plots according to the forest quarter map and submitted to the input of the LANDIS-II model. Forest dynamics modeling for 100 years was carried out, and predictive maps of average tree age distribution were made.

Keywords: *forest landscape models, forest dynamics simulation, remote sensing data, satellite images, forest biomass, tree species classification.*

Введение

Прогнозы динамики лесных экосистем необходимы для понимания того, как лесные экосистемы будут изменяться в будущем под воздействием различных факторов, включая климатические изменения, изменения в использовании земель и другие воздействия человека. Моделирование динамики лесов помогает определить потенциальные последствия подобных изменений на лесные экосистемы (Fabrika, Valent, Merganičová, 2019; Porté, Bartelink, 2002). Полученные прогнозы участвуют в формировании стратегий управления лесами, которые будут обеспечивать устойчивость ресурса, сохранение биоразнообразия, а также предотвращение негативных последствий для экономики и общества. Планирование и управление лесными ресурсами на основе прогнозов динамики лесных экосистем может помочь сбалансировать экономические, социальные и экологические интересы и увеличить долгосрочную устойчивость системы.

Существующие в настоящее время модели прогноза динамики лесных насаждений можно разделить на эмпирические (регрессионные) и процессные (эколого-физиологические) (Furniss и др., 2022; Липаткина Е.В., 2007). Модели первой группы разрабатываются на базе данных массовых экспериментов (например, таблицы хода роста). Наибольшую точность имеют при прогнозировании динамики насаждений, в которых был собран материал для построения регрессий. Для других территорий и при изменении начальных условий (климатические параметры) точность понижается.

Процессные модели описывают структуру экосистемы и механизмы, лежащие в основе ее функционирования. При этом учитывается взаимодействие основных факторов (например, почва, климат, освещенность) и процессов (конкуренция видов, рост, антропогенное воздействие, фотосинтетическое дыхание, сукцессия сообщества), что позволяет имитировать динамику лесных ландшафтов во времени и пространстве. Процессные модели воссоздают детали основных компонентов и процессов экосистем, позволяя оценивать их экологическое развитие на ближайшие десятилетия, прогнозировать влияние вмешательства разного типа, реализации управленческих решений, изменения климата на лес. Учет разнообразных факторов приводит к оценке большего количества возможных сценариев, что в итоге дает наиболее надежные прогнозы динамики леса (Грабарник и др., 2019). Процессные модели лесных ландшафтов являются мощным инструментом для прогнозирования воздействий будущего климата, антропогенного влияния и смены растительности на лесные ландшафты.

Большинству моделей динамики лесных ландшафтов в качестве начальных значений требуется описание исходного породно-возрастного состава территории (Shifley и др., 2017; Suárez-Muñoz и др., 2021). Обычно оно формируется в виде карт растительности, задающих, какие виды деревьев с какими возрастными классами присутствуют на каждом участке ландшафта в начале моделирования. Такую информацию может быть сложно получить для обширных территорий из-за количества времени и материальных издержек, требуемых для масштабных полевых исследований.

Целью работы является разработка методики сбора данных о породно-возрастном составе леса по данным ДЗЗ и их обработки, позволяющей сформировать исходную карту состояния растительности для процессных моделей динамики лесных ландшафтов.

Область исследования

В качестве области исследования было выбрано Голоустненское лесничество Иркутской области (рис. 1). Оно занимает площадь 223 тыс. га, из них земель, покрытых лесной растительностью – 213 тыс. га, что составляет более 95 % всей площади лесничества. Такой высокий процент лесистости позволяет наглядно исследовать изменение лесных ландшафтов при моделировании.

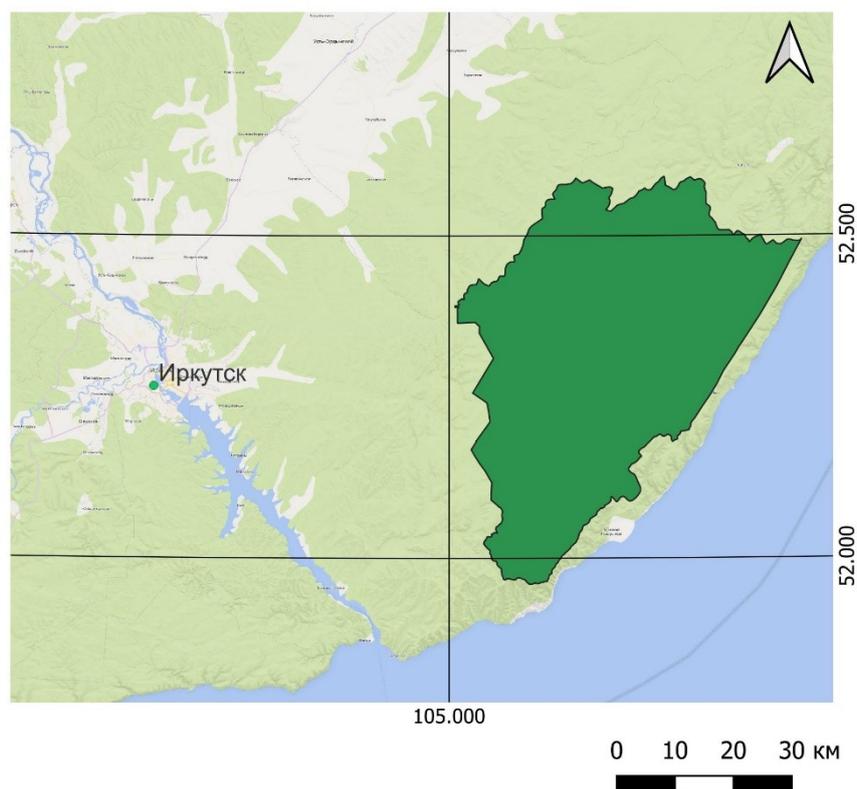


Рис. 1. Область исследования на карте

Материалы и методика исследований

Для формирования входных данных для моделей лесных ресурсов надо определить породу деревьев. Информацию о породах можно получить с мультиспектральных спутниковых изображений, проведя их классификацию методами машинного обучения (Random Forest, SVM,

нейронные сети). Перед классификацией снимков необходимо частично разметить изображения требуемыми классами, подготовив обучающую выборку. В зависимости от точности имеющихся данных (полевые исследования, лесоустроительная информация, снимки сверхвысокого разрешения) в лесах можно выделять как отдельные породы деревьев, так и их группы (хвойные, лиственные и т.п.).

В настоящее время существуют готовые классификации спутниковых изображений на весь мир, набор классов которых содержит разные группы леса. Одна из таких классификаций – GLC_FCS30-2020 – была использована в данной работе. GLC_FCS30 (Zhang и др., 2021) выпущена в 2020 году, имеет разрешение 30 м и содержит такие классы пород деревьев, как Вечнозеленые, Лиственные, Хвойные, Листопадные хвойные, Смешанные, каждый из которых включает категорию сомкнутых и несомкнутых деревьев. Также есть классы Кустарники, которые могут быть лиственные и хвойные.

Использование такой классификации при сборе данных о породах деревьев основано на упрощении – мы используем группы пород вместо отдельных пород. Сделать это позволили особенности исследуемой территории: на ней растет всего семь лесообразующих пород, причем среди хвойных и лиственных есть явно лидирующие породы. У хвойных это сосна (занимает 109 тыс. га из 130 тыс. га хвойных), у лиственных – береза (32 тыс. га из 45 тыс. га). Наличие класса «Листопадные хвойные» в классификации позволило дополнительно выделить лиственницы, которые занимают 26 тыс. га, а по своим характеристикам заметно отличаются от хвойных и лиственных пород. В результате породы исследуемой территории были сгруппированы в три категории: хвойные, лиственные и лиственницы.

Возраст дерева определенной породы напрямую связан с его биомассой, это соответствие можно найти в региональных нормативных материалах. Источником данных о биомассе выступают карты наземной биомассы – above ground biomass (AGB) (Li и др., 2020), полученные по материалам спектральных, радарных и лидарных съемок. AGB – живая растительность над почвой, включая стембель, пень, ветки, кору, семена и листву, выраженная в виде массы на единицу площади. Подобные глобальные наборы данных также существуют в открытом доступе. В работе был использован набор ESA Biomass Climate Change Initiative, содержащий данные за 2018 г. с разрешением 100 м. ESA Biomass составлен на основе комбинации радарных и лидарных данных ДЗЗ.

Информация о соответствии объемов биомассы определенным породам и возрастам деревьев была взята из (Швиденко и др., 2008). Для группы хвойных пород брались таблицы для биологической продуктивности полных сосновых насаждений Центральной и Восточной Сибири, с небольшой корректировкой значений с учетом соответствующих таблиц для лиственницы и кедра. Для группы лиственных основными стали таблицы продуктивности модальных березовых древостоев горнотаежных экорегионов Прибайкалья с учетом значений для осины. Для лиственниц была взята таблица полных лиственничных насаждений лесостепных экорегионов Бурятии и Иркутской области.

Слой состава пород по классификации GLC_FCS30 и биомассы ESA Biomass были обрезаны по контуру границы Голоустненского лесничества, наложены и совмещены. Территория была поделена на участки с помощью векторной карты кварталов лесничества. Для всех участков описан породно-возрастной состав скриптом Python, где каждой точке по значению биомассы сопоставлен возраст в зависимости от присутствующей в ней породы.

В работе моделирование динамики лесного ландшафта рассматривается на примере модели LANDIS-II (He и др., 2004; Scheller и др., 2007; Scheller, Mladenoff, 2004). Она имитирует такие

процессы в лесных насаждениях, как рост и конкуренция деревьев, и ландшафтные процессы, такие как распространение видов деревьев и нарушения. Лес при этом представлен в виде возрастных когорт деревьев в сетке взаимодействующих участков. Отдельные когорты соревнуются за ресурсы (например, влажность почвы, азот и пространство) среди возрастных когорт разных видов в каждой ячейке. LANDIS-II включает в себя библиотеку расширений для имитации различных экосистемных процессов на уровне насаждений и ландшафтов, а также основной модуль, который управляет взаимодействием между расширениями.

Для примера в работе мы использовали расширение Age-Only succession, которое проводит расчеты только возрастной сукцессии, а каждая когорта деревьев проходит через стадии размножения, старения и смерти. На размножение влияют процессы рассеивания семян, затемнения, антропогенного воздействия. Входными данными для Age-Only succession служат карта начального состояния лесных участков, карта экорегионов и таблица параметров пород.

Перед расчетом была составлена таблица входных параметров пород (табл. 1), в которой собраны общие характеристики деревьев для модели LANDIS-II.

Таблица 1. Входные параметры пород

Класс	Срок жизни	Половая зрелость	Расстояние распространения семян		Вегетативное размножение			Устойчивость к затенению	Устойчивость к огню
			Эффективное	Максимальное	Вероятность	Возраст мин.	Возраст макс.		
Лиственные	110	30	200	1000	0,5	0	70	2	2
Хвойные	200	35	20	100	0	0	0	2	3
Лиственницы	200	35	50	600	0	0	0	1	2

Результаты

Для верификации полученного породно-возрастного состава было проведено сравнение суммарных площадей по группам пород и классам возраста с имеющимися данными по лесничеству из материалов лесоустройства из «Лесного плана Иркутской области» за 2018 г. В таблице 2 приведены учетные, расчетные данные и их разность. Видно, что самое высокое значение корреляции получено для группы хвойных, несмотря на разность в 20 тыс. га для приспевающих деревьев. У лиственных корреляция ниже, хотя по общей площади всех возрастов значения наиболее близки среди всех пород (44,9 тыс. га по учетным и 43,6 тыс. га по расчетным данным). Для лиственницы получена отрицательная корреляция, что означает обратную взаимосвязь рядов значений и обусловлено прежде всего заметно завышенной общей площадью этой породы по классификации – 63 тыс. га против 26 тыс. га учетных. В дальнейшем необходимо улучшать точность используемой классификации для более точного выделения пород на территории.

Таблица 2. Сравнение учетных и расчетных данных, тыс. га

Породы	Тип данных	Молодняки 1 кл.	Молодняки 2 кл.	Средне-возрастные	Приспевающие	Спелые	Перестойные	Итого	Корреляция
Хвойные	Учетные	7175	21488	50919	12289	18555	19991	130417	0,67
	Расчетные	2310,97	21362,16	44947,8	32540,49	791,49	978,6106	102931,5	
	Разность	4864,03	125,84	5971,2	-20251,49	17763,51	19012,39	27485,48	

Листо- вен- ные	Учетные	14690	84	12090	3901	10322	3875	44962	0,34
	Расчетные	2310,88	2497,81	13068,74	10939,58	11003,29	3784,27	43604,57	
	Разность	12379,12	-2413,81	-978,74	-7038,58	-681,29	90,73	1357,43	
Листо- вен- ница	Учетные	184	452	6059	2180	7155	10439	26469	-0,19
	Расчетные	3775,5	21146,98	29518	8244,42	325,14	95,84	63105,88	
	Разность	-3591,5	-20694,98	-23459	-475,42	6829,86	10343,16	-31047,88	

Моделирование расширением Age-Only succession для Голоустненского лесничества было проведено на период 100 лет, начиная с 2018 г. По результатам работы модели построены карты динамики возрастного состава, приведенные на рисунках 2-5.

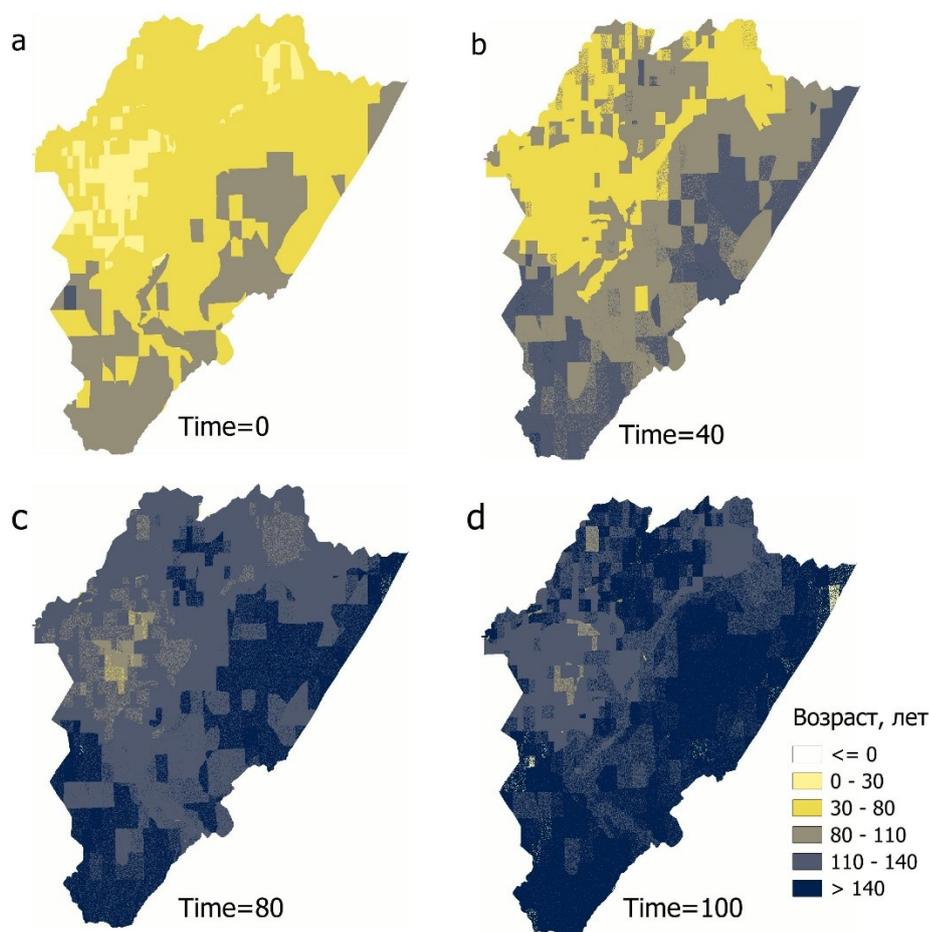


Рис. 2. Средние значения возраста по всем породам

Средние значения – сумма всех возрастных когорт, разделенная на количество когорт, присутствующих на участке. В процессе моделирования средний возраст на всех участках постепенно повышается. Вначале большие значения возраста сконцентрированы вдоль северных и восточных границ лесничества, через 40 лет добавляется рост значений в южной части, а в северной и восточной он усиливается. Через 80 и 100 лет эта тенденция продолжается, заметно только отставание в центрально-западной части. Расширение Age-Only succession рассчитывает только естественный рост и отмирание леса без учета воздействия негативных и антропогенных факторов (рубки, пожары, воздействие вредителей и болезней леса), а более 60 % области исследования занято хвойными деревьями со сроком жизни 200 лет. Поэтому на рисунке

2 мы видим заметное повышение среднего возраста деревьев через 100 лет периода моделирования.

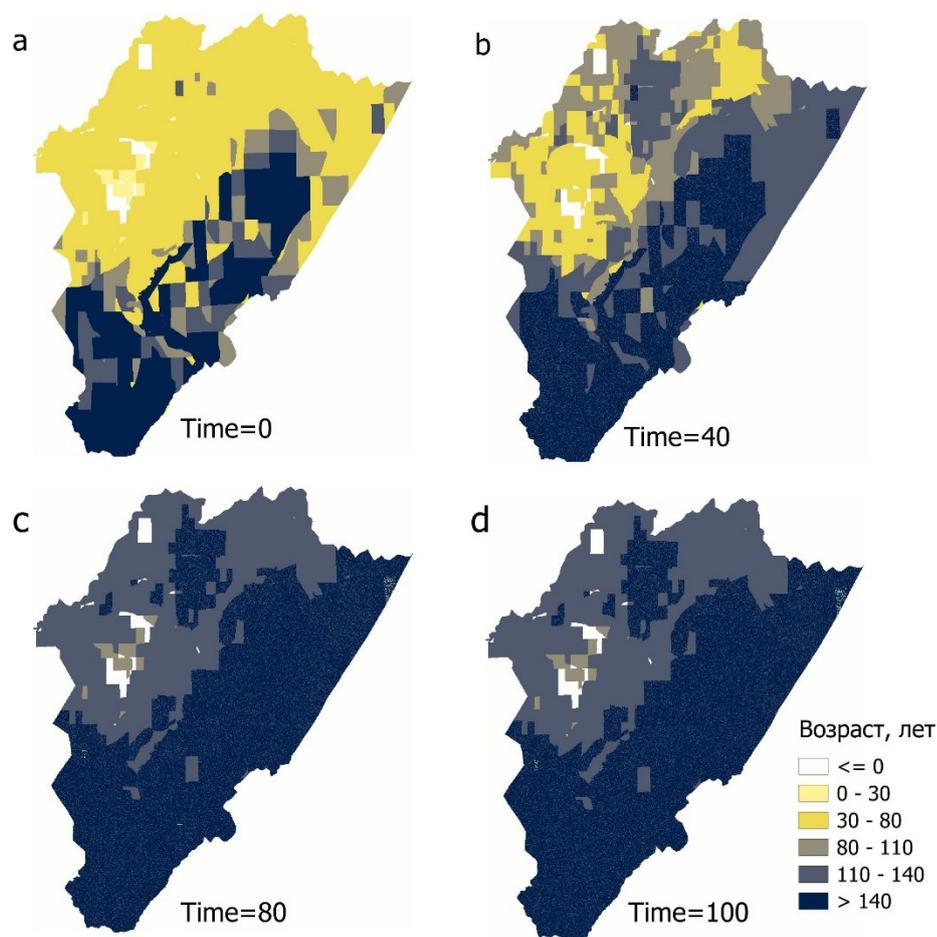


Рис. 3. Максимальный возраст хвойных пород

Максимальный возраст хвойных пород (рис. 3) также показывает рост на всей территории. Здесь явно прослеживаются особенности пространственного распределения хвойных пород в лесничестве – в начале моделирования больше спелых и перестойных деревьев собрано в северной и восточной частях, тогда как на остальной части растут более молодые деревья. Поэтому при средней продолжительности жизни этой группы в 200 лет за 100 лет прогноза наблюдается постепенное увеличение возраста хвойных.

Динамика максимального возраста лиственницы (рис. 4) похожа на динамику хвойных пород из-за совпадающей продолжительности жизни (200 лет). Отличия наблюдаются из-за разницы в начальном распределении деревьев по территории – у лиственницы больше спелых деревьев в восточной части, в северной – меньше перестойных. Через 40 и 80 лет в южной части быстрее повышается их максимальный возраст, а через 100 лет по восточной и северо-западной оконечностям заметно начало естественного отмирания деревьев.

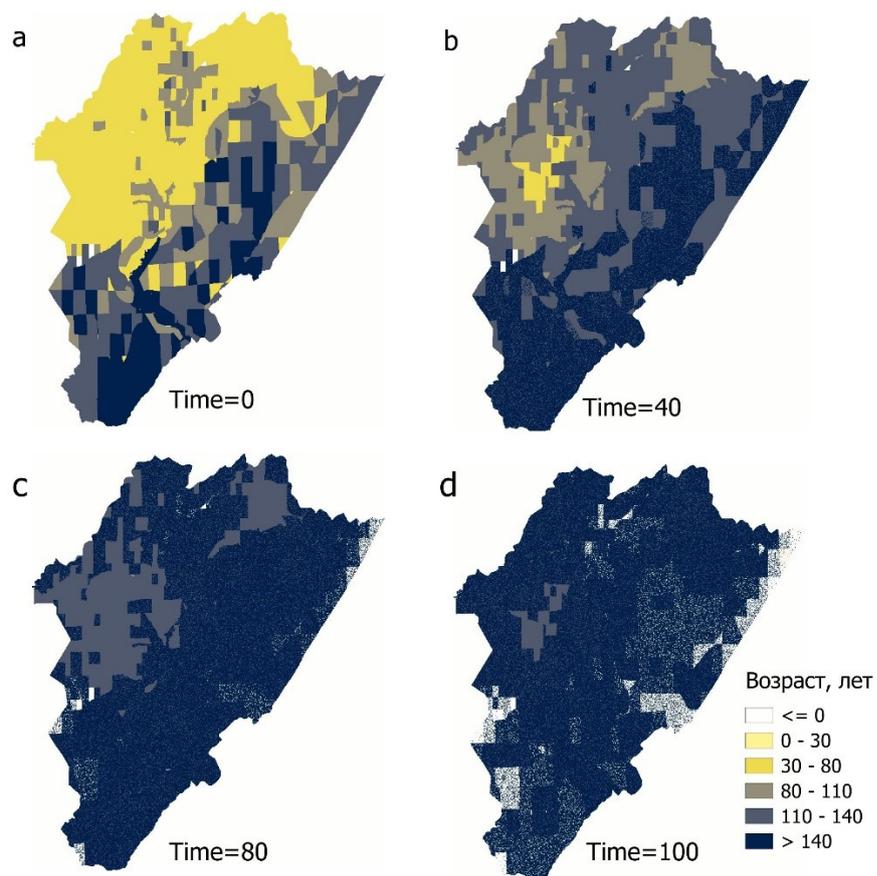


Рис. 4. Максимальный возраст лиственницы

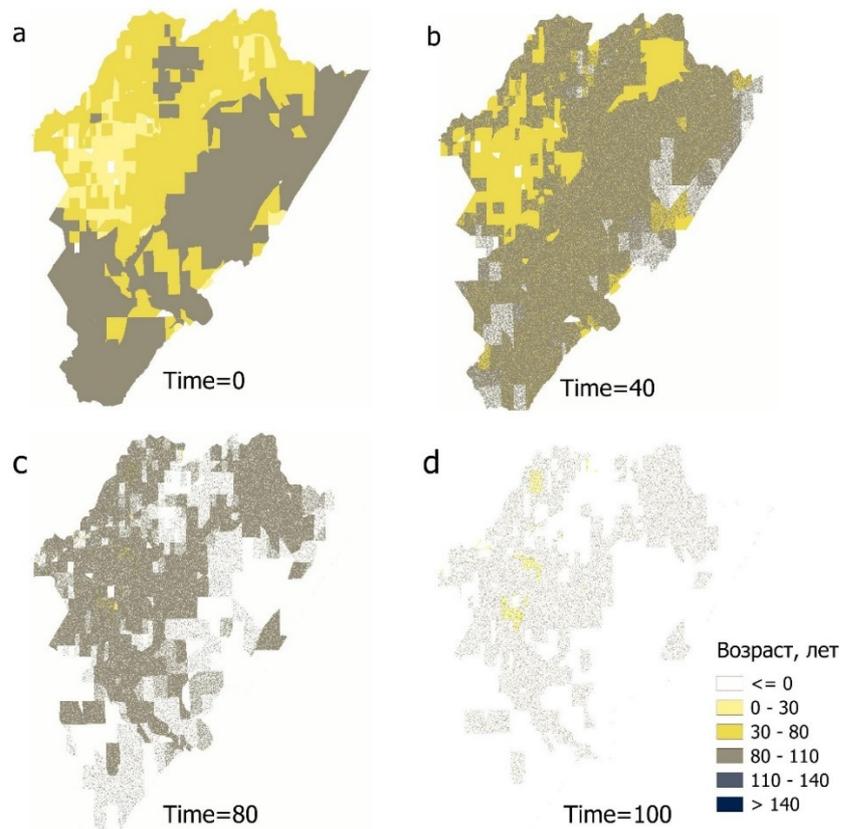


Рис. 5. Максимальный возраст лиственных пород

У лиственных пород динамика максимального возраста заметно отличается (рис. 5). Это связано с более коротким сроком жизни (100 лет), который совпадает с длиной периода моделирования. Из-за этого уже через 80 лет видно отмирание деревьев, а через 100 лет оно наблюдается почти на всей площади лесничества.

Выводы

Предложенная методика позволяет собрать данные, необходимые для инициализации модели лесных ландшафтов, из открытых источников. Описанные в работе наборы данных являются глобальными, поэтому на их основе можно формировать породно-возрастной состав любой территории. При этом подобное использование данных ДЗЗ основано на ряде упрощений: конкретные породы деревьев частично были заменены группами пород, при установлении связи значений биомассы и возраста лес считался однородным по составу и бонитету. Преимуществом подхода выступает снижение стоимости и ускорение подготовки данных по сравнению с полевыми исследованиями. С помощью наборов данных GLC_FCS30 и ESA Biomass в работе был сформирован породно-возрастной состав по кварталам Голоустненского лесничества, затем проведены расчеты моделью LANDIS-II на 100 лет. Полученные прогнозы позволяют увидеть состояние территории в будущем, спрогнозировать состояние лесов в ответ на воздействие различных факторов.

Работа поддержана в рамках госзадания Минобрнауки России по проекту «Методы и технологии облачной сервис-ориентированной цифровой платформы сбора, хранения и обработки больших объёмов разноформатных междисциплинарных данных и знаний, основанные на применении искусственного интеллекта, модельно-управляемого подхода и машинного обучения» (номер гос. регистрации 121030500071-2).

Библиографический список

1. Грабарник П.Я., Шанин В.Н., Чертов О.Г., Припутина И.В., Быховец С.С., Петропавловский Б.С. и др. Моделирование динамики лесных экосистем как инструмент прогнозирования и управления лесами // Лесоведение. 2019. № 6. С. 488–500. DOI: 10.1134/s0024114819030033.
2. Липаткина Е.В. Математическое моделирование лесных объектов ГИС и экономика // Лесной вестник. 2007. Т. 3. С. 113–117.
3. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Нильссон С., Булуй Ю.И. Таблицы и модели роста и продуктивности основных лесобразующих пород Северной Евразии. Москва: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2008. 886 с.
4. Fabrika M., Valent P., Merganičová K. Forest modelling and visualisation - state of the art and perspectives // Cent. Eur. For. J. 2019. Т. 66, № 3–4. С. 147–165. DOI: 10.2478/forj-2019-0018.
5. Furniss T. J., Hessburg P.F., Povak N.A., Salter R.B., Wigmosta M.S. Predicting future patterns, processes, and their interactions: Benchmark calibration and validation procedures for forest landscape models // Ecol. Modell. 2022. Т. 473. С. 110099. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110099.
6. He H.S., Li W., Sturtevant B.R., Yang J., Shang B.Z., Gustafson E.J., Mladenoff D.J. LANDIS: A Spatially Explicit Model of Forest Landscape Disturbance, Management, and Succession LANDIS 4.0 Users Guide., 2004.
7. Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms // Sci. Rep. 2020. Т. 10. С. 9952. DOI: 10.1038/s41598-020-67024-3.
8. Porté A., Bartelink H. H. Modelling mixed forest growth: A review of models for forest management // Ecol. Modell. 2002. Т. 150, № 1–2. С. 141–188. DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00476-8.
9. Scheller R.M., Domingo J.B., Sturtevant B.R., Williams J.S., Rudy A., Gustafson E.J., Mladenoff D.J. Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution // Ecol. Modell. 2007. Т. 201. № 3–4. С. 409–419. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009.

10. Scheller R.M., Mladenoff D. J. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application // *Ecol. Modell.* 2004. T. 180. C. 211–229. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2004.01.022.
11. Shifley S.R., He H.S., Lischke H., Wand W.J., Jin W., Gustafson E.J., et al. The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models // *Landsc. Ecol.* 2017. T. 32, № 7. C. 1307–1325. DOI: 10.1007/s10980-017-0540-9.
12. Suárez-Muñoz M., Mina M., Salazar P.C., Navarro-Cerrillo R.M., Quero J.L., Bonet-Garca F.J. A Step-by-Step Guide to Initialize and Calibrate Landscape Models: A Case Study in the Mediterranean Mountains // *Front. Ecol. Evol.* 2021. T. 9. C. 653393. DOI: 10.3389/fevo.2021.653393.
13. Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J.G. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery // *Earth Syst. Sci. Data.* 2021. T. 13. C. 2753–2776.

References

1. Grabarnik P.Ya., Shanin V.N., Chertov O.G., Pripulina I.V., Bykhovets S.S., Petropavlovskii B.S. et al. Modelirovanie dinamiki lesnykh ekosistem kak instrument prognozirovaniya i upravleniya lesami (Modeling of forest ecosystem dynamics as a tool for forecasting and forest management). *Lesovedenie.* 2019. № 6. Pp. 488–500. DOI: 10.1134/s0024114819030033.
2. Lipatkina E.V. Matematicheskoe modelirovanie lesnykh obektov GIS i ekonomika (Mathematical modeling of forest objects GIS and economy). *Lesnoi vestnik.* 2007. T. 3. Pp. 113–117.
3. Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Nil'sson S., Bului Yu.I. Tablitsy i modeli rosta i produktivnosti osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoi Evrazii (Tables and Models of Growth and Productivity of Forests of Major Forest Forming Species of Northern Eurasia). Moskva: Federalnoe agentstvo lesnogo khozyaistva. 2008. 886 p.
4. Fabrika M., Valent P., Merganičová K. Forest modelling and visualisation - state of the art and perspectives. *Cent. Eur. For. J.* 2019. T. 66, No. 3–4. Pp. 147–165. DOI: 10.2478/forj-2019-0018.
5. Furniss T. J., Hessburg P.F., Povak N.A., Salter R.B., Wigmosta M.S. Predicting future patterns, processes, and their interactions: Benchmark calibration and validation procedures for forest landscape models. *Ecol. Modell.* 2022. T. 473. Pp. 110099. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110099.
6. He H.S., Li W., Sturtevant B.R., Yang J. Shang B.Z., Gustafson E.J., Mladenoff D.J. LANDIS: A Spatially Explicit Model of Forest Landscape Disturbance, Management, and Succession LANDIS 4.0 Users Guide., 2004.
7. Li Y., Li M., Li C., Liu Z. Forest aboveground biomass estimation using Landsat 8 and Sentinel-1A data with machine learning algorithms. *Sci. Rep.* 2020. T. 10. P. 9952. DOI: 10.1038/s41598-020-67024-3.
8. Porté A., Bartelink H. H. Modelling mixed forest growth: A review of models for forest management. *Ecol. Modell.* 2002. T. 150. No. 1–2. Pp. 141–188. DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00476-8.
9. Scheller R.M., Domingo J.B., Sturtevant B.R., Williams J.S., Rudy A., Gustafson E.J., Mladenoff D.J. Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecol. Modell.* 2007. T. 201, No. 3–4. Pp. 409–419. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009.
10. Scheller R.M., Mladenoff D. J. A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application. *Ecol. Modell.* 2004. T. 180. Pp. 211–229. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2004.01.022.
11. Shifley S.R., He H.S., Lischke H., Wand W.J., Jin W., Gustafson E.J., et al. The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models. *Landsc. Ecol.* 2017. T. 32, No. 7. Pp. 1307–1325. DOI: 10.1007/s10980-017-0540-9.
12. Suárez-Muñoz M., Mina M., Salazar P.C., Navarro-Cerrillo R.M., Quero J.L., Bonet-Garca F.J. A Step-by-Step Guide to Initialize and Calibrate Landscape Models: A Case Study in the Mediterranean Mountains. *Front. Ecol. Evol.* 2021. T. 9. Pp. 653393. DOI: 10.3389/fevo.2021.653393.
13. Zhang X., Liu L., Chen X., Gao Y., Xie S., Mi J.G. GLC_FCS30: Global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. *Earth Syst. Sci. Data.* 2021. T. 13. Pp. 2753–2776.