

лесной породы или из множества лесообразователей, предлагается использовать понятие **сукцессионной сложности**.

Число признаков сукцессии по мере изучения региональных особенностей развития лесного покрова может возрастать в связи с получением более новых знаний о динамике лесов, что должно стать основой для установления новых признаков или совершенствования предложенных.

Несмотря на длительную историю исследования лесообразовательного процесса, знания о нем фрагментарны. Это связано с тем, что, как правило, изучались только отдельные линии его развития в пределах отдельных типов лесорастительных условий. Так, не исследовалась динамика лесного покрова, состоящего из множества лесных сообществ, приуроченных к различным местообитаниям и относящихся к различным линиям развития леса. В связи с возникающей потребностью в оценке лесообразовательного процесса обширных лесных территорий является целесообразным обсуждение места и роли лесного покрова в развитии биогеоценотического покрова в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варминг Е. Ойкологическая география растений. М.: Типография Баландина, Волконка, д. Милалково, 1901. 542 с.
2. Ивашкевич Б.А. Типы лесов Приморья и их экологическое значение / Производительные силы Дальнего Востока. Т. 3. Хабаровск, Владивосток: Дело, 1927. С. 52.
3. Кирсанов В.А. Формирование и развитие кедровника зеленомошно-ягодникового на Северном Урале // Восстановительная и возрастная динамика лесов на Урале и в Зауралье. Свердловск, 1976. С. 104-123.
4. Колесников Б.П. Кедровые леса Дальнего Востока. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 264 с.
5. Морозов Г.Ф. Учение о лесе. М.-Л.: Гос. изд-во с.-х. и колхозно-кооп. лит-ры, 1931. 438 с.
6. Смолюков Е.П. Возрастная динамика и хозяйственно-выборочные рубки в широколиственно-темнохвойных лесах водоохранный-защитной полосы реки Уфы в пределах Свердловской области // Динамика и строение лесов на Урале. Свердловск, 1970. С. 117-134.
7. Седых В.Н. Лесообразовательный процесс. Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, препринт. Красноярск, 2006. С. 32.
8. Седых В.Н. Формирование кедровых лесов Приобья. Новосибирск: Наука, 1979. 110 с.
9. Сукачев В.Н. Избранные труды. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Т. 1. Л.: Наука, 1972. 418 с.

УДК 630*5; 630*6

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛЕСООБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА И ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

А. ШВИДЕНКО^{1,2}, Э. ГУСТАФСОН (E. GUSTAFSON)³

¹International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria

²Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

³Institute for Applied Ecosystem Studies, USDA Forest Service, Northern Research Station, USA

АННОТАЦИЯ

Дан краткий анализ математических моделей, применяемых для описания динамики лесных экосистем в разных пространственных и временных масштабах. Особый интерес для познания лесообразовательного процесса представляют ландшафтные модели нарушений и сукцессий (LDSMs), имеющие достаточные эмпирические предпосылки и полноту описания процессов в изменяющихся условиях внешней среды. На примере модели LANDIS-II показаны возможности применения LDSMs в научных целях и в качестве средства адаптивного управления лесами Сибири.

Базовый подход классического лесного хозяйства к познанию процессов формирования, оценки состояния, продуктивности и динамики лесов – судить о будущем на основе знания прошлого – становится все менее состоятельным в интенсивно меняющемся мире. В полной мере это относится к исследованиям сукцессионной динамики лесов, включая традиционные модели динамики и роста леса. Еще полвека назад две причины – потребности познания и меняющиеся условия внешней среды – вызвали естественное стремление перехода к «процессным» моделям, предназначенным объяснять, как деревья и лес растут [4]. Постепенно появились многочисленные модели динамики лесной растительности, различные по подходам и масштабам: модели, описывающие рост отдельных деревьев на основе процессов, протекающих в кроне; различные разновидности ландшафтных моделей; функциональные (role-based) модели; биогеографические модели; глобальные модели продуктивности и другие (напр., [12]). Рост внимания к глобальным климатическим изменениям интенсифицировал разработку глобальных динамических моделей растительности (DGVMs), которые интегрировали проблематику различных типов ранее существовавших моделей: биогеохимических (отклик функций

экосистем на изменения климата и атмосферной концентрации CO₂), биогеографических (изменение границ биомов и перераспределение размещения растительности) и моделей, описывающих процессы обмена веществом и энергией в системе Земля – атмосфера. Сегодня существует несколько десятков DGVMs различных типов, например, (1) модели, базирующиеся на данных дистанционных наблюдений – CASA, GLO-PEM, SDBM, TURC, SIB2 с использованием концепции эффективности использования света, (2) базирующиеся на имитационном моделировании сезонных биогеохимических потоков с использованием климата, почвы и распределения растительности – HRBM, CENTURY, TEM, CARAIB, FBM, PLAI, SILVAN, BIOME-BGC, KGBM и (3) имитирующие функции экосистем (биогеохимические потоки) и структурные особенности растительности (тип растительности и его структура), такие как BIOME3, DOLY, HYBRID. Модели эти постоянно совершенствуются, включая новые механизмы и важные региональные модули, например, лесные пожары или специфику гидрологического цикла на вечной мерзлоте.

Однако очень скоро выяснилось, что процессные модели разного уровня, назначения и масштаба (в т.ч. DGVMs) имеют ограниченные перспективы непосредственного практического применения, оставаясь, главным образом, средством количественного объяснения процессов использования лесными экосистемами жизненных ресурсов внешней среды, а также прогноза. Попытки минимизировать – до возможной степени – наиболее существенные недостатки «традиционного» и «процессного» подходов привели к появлению гибридных моделей, из которых первыми были семейства моделей JABOWA и FORCYTE. Они не нашли широкого применения в практике лесного хозяйства из-за значительной «процессной» составляющей и отсутствия пространственно распределенной информации для параметризации моделей, хотя и сыграли свою положительную роль в понимании механизмов формирования и роста лесов. Другое направление исходило из целесообразности использования в качестве основы накопленного эмпирического материала роста и развития леса, в частности, опытных таблиц хода роста. Последние моделировались в форме, позволяющей вносить изменения для оценки отклика (роста, прироста, первичной продукции) в связи с меняющимися параметрами внешней среды (климат, удобряющий эффект CO₂, осаждения азота) [1].

Интересная попытка формального описания сукцессионной динамики лесов азиатской части России была осуществлена группой российских ученых [2, 3]. В качестве базовых пространственных единиц классификации и численного описания сукцессий были использованы экорегионы (крупные ландшафтные образования с однородностью климата на уровне лесорастительных подзон) и субэкорегионы, понимаемые как обобщенный тип ландшафта. Типология сукцессий строилась по лесным ассоциациям (преобладающим породам коренных типов леса) с делением на три типа гидрологического режима (автоморфные, полугидроморфные и гидроморфные местообитания). Временная компонента включала две базовые единицы – фазу (как морфологически обособленный временной период лесообразовательного процесса) и стадию (отражающую возрастную динамику в пределах фазы) с учетом «направления» развития древостоев. Направления классифицировались по четырем типам (демутационный, депрессионный, климаксовый и устойчивого развития). Типы сукцессионной динамики в основном определялись режимами природных и антропогенных нарушений и на верхнем уровне классификации включали (1) климатоморфогенные (сингенетические смены формирования), (2) биогенные, (3) ценогенные (возрастные смены), (4) пирогенные, (5) антропогенные и (6) (условно) климаксовые. В рамках обозначенного пространства классификации указывались: тип гидрологического режима; доля в экорегионе (субэкорегионе); вероятное количество видов; тип сукцессии и направление развития; фаза; стадия; для каждой стадии – длительность; тип вертикальной структуры; тип возрастной структуры; средний состав по ярусам; средний класс бонитета; запас (фактический и оптимальный); показатели видового разнообразия. Указанная работа в концентрированном виде представила современные знания о сукцессионной динамике лесов на континентальном масштабе и предполагаемую динамику в пределах сукцессионного цикла. Этот подход практически использовал идею «траекторных» ландшафтных моделей, однако был лишен ограничений формализованного моделирования. Вместе с тем эта работа имела принципиальный недостаток: ее результаты представляли формализованное экспертное мнение группы ученых, надежность которого оценить невозможно.

Методологические сложности прогнозирования динамики лесов в условиях глобальных изменений очевидны и значительны. На территории России темпы потепления не уменьшаются, и рост средней годовой температуры может достигнуть в бореальной зоне 5-10°C к концу нынешнего столетия при прогнозируемом увеличении глобальной температуры на 1,4-5,8°C (IPCC 2007). Исторический опыт научного лесоводства не содержит эмпирических данных для оценки влияния подобных изменений на лесные экосистемы. Максимальные изменения лесной растительности ожидаются на южной и северной границах лесной зоны. Однако многие принципиальные вопросы остаются недостаточно понятыми, в частности: (1) в чем главнейшие особенности функционирования лесных экосистем в динамических условиях множественных ограничений на жизненные ресурсы? (2) насколько устойчивым является

прямое стимулирование интенсивности фотосинтеза и ЧПП изменениями внешней среды? (3) где граница удобряющего воздействия возрастающей концентрации CO₂ и как долго оно будет сказываться? (4) насколько осаждения азота могут смягчать недостаток доступного азота в северных лесах? (5) как все эти изменения взаимодействуют с гидрологическим циклом, в частности, с водным стрессом? (6) как разрушение вечной мерзлоты повлияет на состояние и функционирование лесных экосистем высоких широт? Многофакторность воздействий и сложность отклика экосистем иллюстрируются следующим примером. Возрастающие температуры могут оказаться выше физиологического оптимума для ряда северных пород, однако оптимум фотосинтеза для ряда C3 растений существенно повышается наряду с ингибированием дыхания с повышением концентрации CO₂ (порядка 5°C при удвоении концентрации [9]), поэтому к неопределенностям климатических предсказаний добавляется неопределенность возрастания концентрации углекислоты и реакции растений на многофакторное изменение внешней среды. В ряде модельных опытов для пограничной зоны между бореальными и умеренными лесами включение этого фактора вело к изменению растительных формаций – от темнохвойных к сосновым лесам [13].

Необходимость перехода к адаптивному лесоуправлению, особенно в долгосрочном, стратегическом отношении, очевидна. Также очевидно, что сложность многочисленных взаимосвязанных экологических процессов, протекающих в широком временном и пространственном диапазоне, превосходят возможности «интуитивного» принятия оптимальных решений в процессе лесоуправления. Это вызвало к жизни многочисленные ландшафтно-сукцессионные пространственно-ориентированные модели (обычно называемые моделями нарушений и сукцессий – LDSMs) как основное средство долгосрочного прогноза и адаптивного планирования лесохозяйственных мероприятий в условиях глобальных изменений. Основные типы LDSMs – траекторные детерминистские (pathway deterministic, напр., VFFT/TESLA, LANDSUM) и стохастические (pathway stochastic – SIMPPLE, RMLANDS), процессные (LANDIS, LANDSIM) и комбинированные (SELES) [7, 10], которые, в сущности, являются компьютерными программами для предсказания изменений ландшафтов во времени. Это обширная группа моделей – например, классификация LDSMs, приведенная в [11], насчитывает 8 групп, отличающихся механизмом пространственного взаимодействия, экосистемными процессами и динамикой популяций. Свыше 40 различных ландшафтных моделей рассматривают растительные пожары – их возникновение, распространение, эффект и влияние на сукцессионную динамику [8]. Предпосылки, механизм и специфика моделей рассматриваются во многих публикациях [7, 8, 11]. Современные ландшафтные модели (1) включают многообразие управленческих целей и действий; (2) описывают основные экологические процессы и их взаимодействия; (3) моделируют пространственные взаимодействия в явном виде; (4) дают возможность системного прогноза базовых экологических характеристик экосистем [7]. Большинство существующих моделей были созданы как исследовательское средство, но некоторые имеют дружественные интерфейсы и могут быть легко применимы в практическом лесоуправлении.

Мы использовали модель LANDIS-II в комбинации с физиологической моделью PnET-II для прогноза сукцессионной динамики таежных лесов Иркутской области (часть Северного лесхоза площадью ~270 тыс. га). LANDIS-II является пространственно распределенной ландшафтной динамической моделью, учитывающей нарушения, сукцессии и управление [5, 6, 10]. Она моделирует будущие леса (использовался пространственный грид 100x100 м), отслеживая динамику породного состава лесов с включением природных и антропогенных нарушений. Лесной ландшафт разделяется на однородные типы лесорастительных условий (экорегions), внутри которых вероятности возобновления пород и режимы нарушений одинаковы. Модель включает различные расширения сукцессионного плана, такие как пожары, ветровалы, вспышки размножения насекомых и болезней, лесозаготовки, прогноз динамики биомассы [5, 6]. Прогноз был дан в различных вариантах воздействия на леса (естественное развитие, лесозаготовки), режимов нарушений (пожары, насекомые, ветровалы), климатических изменений (современный климат и прогноз по климатической модели HADCM3, A2 сценарий IPCC – потепление +5,1°C, осадки +20 % к концу XXI века). Реакция ландшафта оценивалась по ряду показателей, в т.ч. по изменению породного состава лесов; величине фитомассы; возрастной структуре лесов; фрагментации лесного покрова. Основные выводы моделирования сводятся к следующему. (1) Прямой эффект воздействия климатических изменений на леса исследуемого региона не является столь значительным, как влияние лесозаготовок в ранее не эксплуатируемых лесах и потенциальных вспышек сибирского шелкопряда. (2) Хотя величина сгоревших площадей несколько возрастает, изменения климата оказывают достаточно скромное влияние на изменение пожарного режима. (3) Высока вероятность того, что глобальные изменения приведут к существенному изменению породного состава лесного покрова Центральной Сибири. (4) Наблюдается некоторое увеличение биомассы, что объясняется изменением породного состава лесов. (5) Акселерация режимов нарушений существенно уменьшает потенциальную возможность долгосрочного секвестра углерода лесами. (6) Существенно возрастает фрагментация лесного покрова.

Результаты моделирования позволяют высказать ряд соображений по стратегии адаптивного управления лесами Сибири.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии* / А.З. Швиденко, Д.Г. Щепаченко, С. Нильссон и др. Москва: Федеральное агентство лесного хозяйства и Межд. ин-т прикладного системного анализа, 2008. 886 с.
2. *Швиденко А.З., Ефремов Д.Ф., Россков В.А. и др.* Продуктивность лесов России. 3. Пространственный масштаб оценки продуктивности // Лесохоз. информация, 2001, 1-2. С. 7-23.
3. *Фарбер С.И.* Формирование древостоев Восточной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 436 с.
4. *Assmann E.* The principles of forest yield studies, SH Gardiner, translator. Pergamon Press, Oxford, 1970. 217 pp.
5. *Gustafson E.J., Shifley S.R., Mladenoff D.J. et al.* (2000) Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LANDIS. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30: 32-43.
6. *Gustafson E.J., Zolner P.A., Sturtevant B.R. et al.* Influence of forest management alternatives and land-type on susceptibility to fire in northern Wisconsin, USA // Landscape Ecology, 2004, 19: 327-341.
7. *Gustafson E.J., Sturtevant B.R., Shvidenko A.Z. et al.* Using landscape disturbance and succession models to support forest management // Chapter 6 in «Landscape Ecology» (IUFRO Book Series, in press).
8. *Keane R.E., Cary G.J., Davies I.D. et al.* A classification of landscape fire succession models: spatial simulations of fire and vegetation dynamics // Ecological Modelling, 2004, 179: 3-27.
9. *Long S.P.* Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentration has its importance been underestimated // Plant, Cell and Environment, 1991, 14: 729-739.
10. *Scheller R.M., Mladenoff D.J.* A forest growth and biomass module for a landscape simulation mode, LANDIS: design, validation, and application // Ecological Modelling, 2004, 180: 211-229.
11. *Scheller R.M., Mladenoff D.J.* An ecological classification of forest landscape simulation models: tools and strategies for understanding broad-scale forested ecosystems // Landscape Ecology, 2007, 22: 491-505.
12. *Shugart H.H., Emanuel W.R., Shao G.* (1996). Models of forest structure for conditions of climate change. Commonwealth Forestry Review, 1996, 75: 51-64.
13. *Xu C.M., Certner G.Z., Scheller R.M.* (2007). Potential effect of interaction between CO₂ and temperature on forest landscape response to global warming // Global Change Biology, 2007, 13: 1469-1483.
