

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Павла Владимировича Фролова
на тему «Моделирование популяций кустарничков в лесных
экосистемах и их вклада в динамику углерода и азота»
представленную на соискание ученой степени кандидата биологических наук
по специальности 03.02.08 - «Экология (в биологии)»

Диссертационная работа П.В. Фролова обобщает многолетние исследования популяционной динамики черники и брусники (доминантов кустарничкового яруса бореальной зоны) и её количественного анализа методами имитационного моделирования. Впервые изучено и определено участие этих видов в круговороте углерода и азота для определения их роли в экосистемах, как при стационарных условиях, так и при внешних воздействиях различной интенсивности.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Текст изложен на 141 странице. Работа содержит 25 рисунков и 9 таблиц.

Большой объем проведенных исследований позволил П.В. Флорову дать всестороннюю оценку биологических подходов к моделированию динамики растений и существующих моделей отечественных и зарубежных коллег в сравнении с результатами собственных исследований. Библиографический список включает 332 работы, из которых 228 на иностранном языке, при этом 14% составляют публикации после 2010 года.

Работа написана хорошим и емким языком, читается с интересом и легко, несмотря на большой объем привлеченного материала. Диссертация хорошо иллюстрирована, результаты представлены в таблицах и графиках.

Глава 1 (Биологические основы подходов к моделированию динамики растений травяно-кустарничкового яруса) включает подробный анализ имеющихся в литературных источниках данных, необходимых для формирования биологических основ моделирования динамики растений травяно-кустарничкового яруса. В **Главе 2** (Обзор существующих моделей травяно-кустарничкового яруса) дан обзор литературы по применению математического моделирования для анализа популяционной динамики растений травяно-кустарничкового яруса и их участия в круговороте биофильных элементов. Рассматривается ряд подходов к моделированию биологических круговоротов и основные типы моделей. Тщательное и разноплановое обсуждение существующих подходов в моделировании позволяет оценить высокий современный уровень выполненной диссертационной работы.

Глава 3 (Описание модели CAMPUS-S) посвящена детальному понятному описанию построения модели. Совершенно верно А.С. Комаров методической основой модели взял онтогенетические состояния модельных видов. Использование счетных единиц (особи и парциальные кусты) позволило дать минимальное пространственное разрешение модели 1 см² при временном шаге модели в 1 календарный месяц. Уникальность и продуманность созданной модели вызывает

восхищение. В работе обоснованы методы построения и разработаны вычислительные алгоритмы математических моделей динамики популяций и сообществ растений и принципов работы созданной модели CAMPUS-S (Cellular Automata Model of Plants' United Spread + Soil), являющейся индивидуально-ориентированной решетчатой имитационной моделью с дискретным пространством. Модель сочетает в себе несколько техник моделирования: техника L-систем (видоспецифичные признаки, обусловленные генотипом, задаются как входные данные), клеточно-автоматное моделирование (реализация схемы развития особи зависит от условий среды и взаимодействия между особями) и матричное моделирование.

Глава 4 (Параметризация и верификация модели CAMPUS-S)

Для определения параметров популяционных характеристик черники и брусники использованы собственные биоморфологические исследования клонов. Методически работы выполнены правильно. Параметры для оценки динамики биофильных элементов взяты из многочисленных данных литературных источников. Важным этапом в верификации модели следует считать проведенное детальное исследование структуры елово-соснового леса (называю по рис. 4.11). Изучены проективное покрытие, онтогенетические спектры, плотность, расположение и биомасса ценопопуляций. Валидация модели показала высокую степень соответствия результатов моделирования натурным данным по всем ключевым параметрам как популяционной динамики, так и продуктивности. Таким образом автор корректно доказал правомерность использования модели.

Глава 5 (Имитационные эксперименты) стала важным итогом создания модели. Автором в составе научного коллектива проведено пять интересных имитационных экспериментов. В заключении четыре вывода из пяти получены именно из этой главы. Доказано, что морфологическая и динамическая поливариантность онтогенеза повышают устойчивость ценопопуляций кустарничков к рекреационной нагрузке, увеличивают скорость занятия территории при инвазии и способствуют ее удержанию. Ценопопуляция, состоящая из растений с разреженным типом расположения дочерних парциальных кустов брусники (морфологическая поливариантность) на подземном побеге имеет преимущество, что можно объяснить меньшей конкуренцией за территорию между вновь образующимися дочерними парциальными кустами и лучшими возможностями для захвата территории. В сосняке чернично-брусничном при изменении климата продуктивность черники снижается при умеренном сценарии, при экстремальном сценарии ценопопуляция черники погибает. Продуктивность брусники возрастает при умеренном и при экстремальном сценарии. Восстановление биомассы ценопопуляций брусники после выборочных рубок в сосняке чернично-брусничном происходит быстрее, чем у черники, при этом в среднесрочной перспективе происходит большее накопление биомассы черники. В ходе имитационных экспериментов на примере сосняка чернично-брусничного показано, что вклад кустарничков рода *Vaccinium* в круговорот углерода и азота по балансу элементов может достигать 45–50% от суммарного вклада растительности.

Актуальность темы исследования определяется отсутствием работающих моделей роста, развития и продуктивности черники и брусники, основных доми-

нантов хвойных лесов Европы, с позиций популяционной биологии видов с учетом влияния разнообразных экологических параметров и антропогенных нарушений. Кроме этого впервые созданы модели динамики углерода и азота в травяно-кустарничковом ярусе лесных экосистем для оценки запасов и динамики данных элементов, а также продуктивности черники и брусники после нарушений разной интенсивности. Также исследование актуально, так как создан новый тип апробированной модели экосистемного уровня. Актуальность темы исследований не вызывает сомнения у ботаников, экологов, геоботаников и лесоводов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Огромный объем работы, выполненной на современном уровне, позволил П.В. Фролову создать новый тип сложной модели CAMPUS-S, провести ее параметризацию, верификацию и имитационные эксперименты и обоснованно доказать работоспособность и универсальность модели для любых лесных видов растений. Результаты получены на основе построения модели по 46 параметрам как стадий жизненного цикла изученных видов, так и экофизическим, продукционным, приростным и экологическим параметрам. Научные положения, выводы и рекомендации основаны на результатах, полученных с использованием комплекса разнообразных объективных математических и статистических методов.

Оценка новизны, достоверности и значимости научных результатов. В результате проведенных исследований впервые представлен количественный анализ популяционной динамики черники и брусники в еловых и сосновых лесах, их продуктивности и вклада в динамику углерода и азота лесных экосистем с учетом их морфологии, онтогенеза и физиологических особенностей в различных условиях, как стационарных, так и при возможном изменении климата и антропогенной нагрузке. Для этого применена разработанная имитационная решетчатая модель CAMPUS-S, основанная на концепции дискретного описания онтогенеза растений и экофизиологическом подходе к вычислению продуктивности растений, с одной стороны, и объединяющая подходы к моделированию с помощью вероятностных клеточных автоматов, L-систем и матричных моделей – с другой. Разработанная модель на настоящий момент не имеет аналогов в мире.

Достоверность и значимость научных результатов диссертационной работы П.В. Фролова не вызывает сомнений. Важность работы велика, так как автор впервые разработал технологию построения модели нового типа, которая имеет возможность гибкой настройки для других видов растений, поскольку построена на алгоритмах, основанных на базовых принципах развития особей в ходе онтогенеза и общих для всех высших растений механизмах фотосинтеза.

Основными недостатками диссертационной работы П.В. Фролова можно считать:

1. Полное отсутствие физико-географической и геоботанической характеристика территории исследований.
2. Необходимо было обосновать возможность объединения материалов по структуре клонов из разных регионов Финляндии и Приокско-Тerrasного заповедника Московской области.
3. Отсутствие описания исходного леса, названия фитоценозов изученных фитоценозов на территории Приокско-Тerrasного заповедника и Отрадинского

участкового лесничества в составе ОЛХ «Русский лес» (Серпуховский район Московской области). Ценопопуляции изучают только в границах конкретного фитоценоза. На картах пробной площади (рис. 4.11 и 4.12) четко видно наличие 2 фитоценозов (сосново-черничного и елово-брусничного) с экотонным участком. Следовательно, речь идет о двух ценопопуляциях в пределах пробной площади для каждого вида.

Заключение

Диссертационная работа Павла Владимировича Фролова представляет собой результат завершенных комплексных многолетних исследований популяционной динамики брусники и черники, их продуктивности и вклада в динамику углерода и азота лесных экосистем с учетом их морфологии, онтогенеза и физиологических особенностей. Автором создан уникальный новый класс рабочей имитационной решетчатой модели CAMPUS-S. При помощи модели CAMPUS-S определено влияние биологических и экологических свойств видов на динамику ценопопуляций при стационарных условиях и при различных внешних воздействиях. Диссертационная работа отличается капитальностью и продуманностью, вносит существенный вклад в развитие теоретических и практических проблем ботаники, экологии, фитоценологии и лесоведения.

Научные положения, выводы и рекомендации, изложенные в диссертационной работе П.В. Фролова обоснованы и не вызывают сомнений.

Результаты диссертации опубликованы в 46 печатных работах, из них 2 статьи в отечественных и 3 – в зарубежных журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus и 2 статьи – опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

Публикации достаточно полно отражают содержание диссертации. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации, основным идеям и выводам диссертации.

Автор неоднократно выступал на конференциях, что позволяет сделать заключение о хорошей апробированности материалов диссертации.

Теоретическая составляющая диссертации может быть использована при рассмотрении вопросов моделирования популяционной организации фитоценозов, структуры и динамики растительности и рационального природопользования в курсах «Популяционная биология растений», «Фитоценология», «Математическое моделирование в биологии и экологии» и «Экология растений». **Практическая значимость** диссертационной работы П.В. Фролова заключается в том, что автором показана возможность использования созданной модели CAMPUS-S для анализа и долгосрочного прогноза изменения структуры и динамики не только кустарничков, но любого вида при изменении экологических параметров и антропогенных нагрузок. Автор разработал метод оценки недревесной продукции лесных экосистем и вклада кустарничков в секвестирование углерода и азота в биомассе и органическом веществе почвы в бореальных лесах.

Диссертационная работа «**Моделирование популяций кустарничков в лесных экосистемах и их вклада в динамику углерода и азота**» отвечает критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», является

научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей значение для развития экологии. Автор диссертационной работы **Павел Владимирович Фролов** как специалист-эколог высокой квалификации, выполнивший законченное научное исследование, имеющее значительный элемент новизны, – заслуживает присуждения ученой степени кандидата биологических наук по специальности 03.02.08 - «Экология (в биологии)».

Уланова Нина Георгиевна, доктор биологических наук (03.00.05 - ботаника), профессор.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», профессор кафедры экологии и географии растений биологического факультета

Адрес: 119234, г. Москва, Ленинские горы д.1, стр.12. Биологический факультет МГУ.

Контактный телефон: 8-9035878437

Адрес электронной почты: Nulanova@mail.ru

Дата 17.03.2020

Уланова

*Корешок руки д-ра И.П. Улановой заверено
д-ром биологического ф-та
МГУ имени М.В. Ломоносова
авд. И.П. Керничский*



И.П. Керничский
5