

DOI 10.31509/2658-607x-202143-90
УДК: 630*8, 004*94

ОЦЕНКА УРОЖАЙНОСТИ ЛЕСНЫХ ЯГОД С УЧЕТОМ УРОВНЯ ОСВЕЩЕННОСТИ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2021 г.

А. А. Колычева¹, С. И. Чумаченко²

¹Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

²МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана
Россия, 141005, Московская обл. Мытищи, 1-я Институтская ул., 1

Email: anna_dulina@bk.ru

Поступила в редакцию: 18.10.2021

После рецензирования: 10.11.2021

Принята к печати: 19.11.2021

Актуальность и цель. Известные в настоящее время методы учета урожайности ягодников неприменимы для многовидовых разновозрастных лесов с наличием подроста и подлеска, широко распространенных на территории России. Сложности возникают из-за комплекса входных параметров, включающих тип лесорастительных условий (ТЛУ), породу деревьев, возраст, полноту, но не описывающих освещенность на уровне травяно-кустарничкового яруса, которая является определяющим фактором урожайности черники, брусники, малины. Целью настоящего исследования является разработка подхода к расчету урожайности лесных ягод с учетом освещенности на уровне напочвенного покрова методами имитационного моделирования.

Материал и методы. Для прогноза используется модель динамики лесных насаждений FORRUS-S. Данные об урожайности взяты из существующего справочника, в котором приведена продуктивность в чистых насаждениях без подроста и подлеска. Использование дополнительного предиктора урожайности ягодников, а именно освещенности на уровне напочвенного покрова, позволило прогнозировать урожайность в лесах более сложной структуры: многовидовых, разновозрастных, с подростом и подлеском.

Результаты и заключение. Разработан оригинальный подход к расчету урожайности лесных ягод. Приведенный подход позволяет оценивать урожайность наиболее распространенных на территории европейской части территории России ягодников: черники, малины, брусники. Получены универсальные уравнения, которые позволяют прогнозировать продуктивность ягодников исходя из таксационных характеристик древостоя и освещенности, рассчитанной в модели.

Ключевые слова: мультифункциональное лесопользование, моделирование урожайности лесных ягод, лесные ягоды, освещенность, урожайность

С каждым годом вопросы мультифункционального лесного хозяйства становятся всё более актуальными. Его главная задача — сохранение и обеспечение баланса между всеми экосистемными услугами (Millennium..., 2005; Wolfslehner et al., 2019; Sheppard et al., 2020; Лукина, 2020; Pohjanmies et al., 2021) с учетом различных взаимосвязей: как синергии (положительные взаимосвязи), так и конфликтов (отрицательные взаимосвязи). Одним из важнейших направлений исследований в этой области является поиск путей избегания конфликтов между обеспечивающими услугами, в частности наиболее востребованными — заготовкой древесины и сбором лесных ягод. Исходя из специфики долгосрочного развития лесного сообщества, проведение натуральных экспериментов затруднительно и высокочувствительно, альтернативным подходом служит применение математического моделирования. Оно позволяет рассмотреть различные способы ведения лесного хозяйства и выявить наиболее благоприятные для совместной заготовки древесины и ягод.

Моделирование для учета урожайности ягодников уже применяется, лидирующие позиции занимают скандинавские страны. По результатам многолетних исследований разработаны модели прогноза урожайности черники и брусники в чистопородных насаждениях сосны и ели (Ihalainen et al.,

2003; Hyyrynen 2003, 2005; Miina et al., 2009, 2010; Turtiainen et al., 2005, 2013, 2016). В России известными подходами к оценке продуктивности ягодников является применение «Таксационного справочника по лесным ресурсам России (за исключением древесины)». Справочник включает более 500 нормативно-справочных таблиц по основным видам недревесных ресурсов лесов России, которые систематизированы по лесорастительным зонам и входящим в них лесным районам Российской Федерации, в том числе лесные ягоды (Курлович, Косицин, 2018). Входными данными для прогноза урожая ягодников в России служат лесотаксационные данные: тип лесорастительных условий, преобладающая порода, возраст древостоя, полнота (Тимошок, Скороходов, 2019). Существенный недостаток этих моделей — нехватка правил для смешанных и многоярусных насаждений, отсутствие подходов для насаждений с подростом, так как полнота в таких насаждениях не является лимитирующим фактором (Конобаева, 2007).

Проблемы расчета продуктивности лесных ягод при наличии второго яруса либо подростка и подлеска можно решить с использованием подходов, учитывающих дополнительный параметр — уровень освещенности напочвенного покрова (Дулина, Чумаченко, 2018, 2019).

Модельные расчеты могут решить проблему недостатка информации о пригодности ягодников лесных участков для заготовки. Комплексная оценка позволяет выявить в долгосрочной перспективе выделы и кварталы, благоприятные для произрастания ягодников с производственной продуктивностью.

Цель данной работы – разработать подход расчета урожайности лесных ягод с учетом освещенности на уровне напочвенного покрова методами имитационного моделирования.

Для достижения цели необходимо (1) провести анализ взаимосвязи урожайности лесных ягод с освещенностью на уровне напочвенного покрова, (2) построить регрессионные зависимости продуктивности лесных ягод от освещенности под пологом леса, (3) выявить подходы учета урожайности черники, брусники, малины в многовидовых разновозрастных насаждениях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Предметами исследования выбраны наиболее распространенные на территории европейской части России ягодники: черника (*Vaccinium myrtillus* L.), брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.), малина (*Rubus idaeus* L.). *Vaccinium myrtillus* L. – один из наиболее часто встречаемых видов ягодников в лесах России, листопадный

многолетний кустарничек из семейства *Ericaceae*. Черника имеет широкий ареал, распространена в средней и южной таежной лесной зоне, а также в зоне хвойно-широколиственных лесов. Наибольших урожаев достигает при средней сомкнутости полога, прямого солнечного освещения не переносит. Ягодники встречаются в сосняках, березняках и ельниках. Наиболее оптимальными условиями для плодоношения является тип лесорастительных условий (ТЛУ) А3-А4, В3-В4 при полноте древостоя от 0.6 до 0.8 (Телишевский, 1986; Конобеева, 2007; Малиновских, 2017).

Vaccinium vitis-idaea L. – вечнозеленый кустарничек семейства *Ericaceae*, также широко распространенный в зонах средней и южной тайги, а также хвойно-широколиственных лесов. Брусника дает максимальные урожаи в редкостойных и среднесомкнутых сосняках, а также произрастает в березняках и ельниках (Брусника..., 1986; Егошина, 2003, 2007). Обильное плодоношение брусники на участках с ТЛУ А2-А4, В2-В5, с полнотой от 0.3 до 0.4.

Rubus idaeus L. – многолетний полукустарник семейства *Rosaceae*, наиболее обширно распространен в зоне смешанных и широколиственных лесов. Произрастает на открытых и полутененных участках, формируется на свежих вырубках и плодоносит до смыкания крон, после может произрастать

в угнетенном состоянии под пологом. Наиболее продуктивные ягодники формируются при ТЛУ А3, В3-В4, С3 на открытых местах (Казанцева, Мирямова, 2017).

Известно, что урожай ягодников сильно варьирует в зависимости от климатических условий в период вегетации. Год от года урожайность одного участка может меняться в зависимости от температуры, осадков, весенних заморозков (Астрологова, 1999). Весеннее потепление определяет интенсивность распускания цветочных почек (Раус, 1972). Заморозки и сухая погода в период цветения ведут к гибели части бутонов. Температура и достаточное количество осадков особенно важны летом в период образования плодов. Осенью и зимой эти факторы определяют закладывание почек и их сохранность до весны (Ярославцев, 2007). Учет всех этих факторов особенно важен для краткосрочного прогноза урожайности ягодников, для рекомендаций в предстоящий сезон. Долгосрочные же прогнозы возможной продуктивности ягодников основываются на данных многолетних наблюдений,

таких как «Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины)» (2018), где представлены показатели средней многолетней урожайности, включающие и неурожайные годы. Рассматриваемый модельный подход также основывается на данных средней многолетней урожайности, а пятилетний шаг работы модели предполагает учитывать не ежегодные климатические изменения, а климатические поправки на регион исследования.

Таким образом, только комплекс факторов создает условия для получения производственной продуктивности ягодников в долгосрочной перспективе. Сводные результаты представлены в таблице 1. ТЛУ, порода и возраст древостоя являются предикторами произрастания кустарничков, а на продуктивность прямое влияние оказывает полнота, которая характеризуется не только сомкнутостью древесного полога, но и освещенностью под ним с учетом влияния всего комплекса растительности на участке, включая подрост и подлесок (Малиновских, 2016, 2017). Следовательно, лимитирующим

Таблица 1. Экологические условия получения производственной продуктивности ягод (Landolt, 1977; Цыганов, 1983; Телишевский, 1986; Черкасов и др., 1988)

Ресурс	ТЛУ	Возраст древостоя	Оптимальная полнота	Порода
Черника	А3, А4, В3, В4, С3	>50	0.6-0.8	Сосна Ель Береза
Брусника	А2, А3, А4, В2, В3, В4, В5	>40	0.3-0.4	
Малина	А3, В3, В4, С3	-	Открытые места	

фактором урожайности ягодников является именно освещенность на уровне напочвенного покрова, а не только полнота древостоя.

Моделируется урожайность ягодников только на участках, где возможно получение производственной продуктивности, неплодоносные участки были исключены из расчетов. К примеру, ягодники не произрастают на бедных сухих почвах и не терпят переувлажнения, следовательно, ТЛУ А1, В1, С1, А5, В5, С5 были исключены из расчетов урожайности. Черника и брусника не произрастают в молодняках, вследствие чего их урожаи рассчитываются начиная со средневозрастных насаждений. Малинники же, наоборот, исчезают в средневозрастных насаждениях, поэтому расчет производственной продуктивности полукустарничка производится только в молодняках и на свежих вырубках.

По световым характеристикам также были выявлены условия, при которых участки не входят в расчет производственной продуктивности ягодников. Черничникам в затененном пологе не хватает света для нормального плодоношения кустарничков, а на открытых местах происходит вытеснение более конкурентными светолюбивыми видами. Для роста и развития брусничников подходят высокоосвещенные участки, при этом на открытых участках они вытесняются конку-

рентными растениями. Малинникам тоже необходимы высокоосвещенные участки, поэтому под пологом средневозрастных и более возрастных древостоев производственная продуктивность не достигается.

Экологические условия произрастания оказывают ключевое воздействие на рост и продуктивность лесных ягод, но так как одним из инструментов ведения многоцелевого неистощительного устойчивого лесного хозяйства являются рубки, следует учитывать их влияние на урожайность ягодников. После проведения рубок изменяются микроклиматические условия, которые вызывают усиленное развитие живого напочвенного покрова, особенно злаков (Сергиенко, 2012). Сплошные и выборочные рубки по-разному влияют на сохранность подраста и живого напочвенного покрова, в том числе и ягодников. Восстановление ягодников после рубок связано с восстановлением всех компонентов леса (Обыденников, Ключников, 1998). Для сохранения ягодных кустарничков обязательно проведение рубок в зимнее время. После сплошных рубок в зависимости от условий их проведения и дальнейшего лесовосстановления происходит развитие ягодников. Основным фактором, определяющим скорость процессов восстановления зарослей ягодных растений, является свет, недостаток которого, например,

для брусники и черники, отмечается на возобновившихся вырубках многие годы (Черкасов, 1988).

Черника после проведения сплошных рубок в первые 2–3 года снижает урожайность, а затем угнетается полностью из-за интенсивного солнечного света и конкурентного давления других компонентов живого напочвенного покрова, в частности травянистой растительности (Залесов, 2017). Восстанавливается ягодник через 40–50 лет после рубок (Черкасов, 1988) Длительное восстановление связано привязанностью ягодника к определенному световому режиму. В молодняках полог сильно затенен, только в преспевающих и спелых насаждениях полнота древостоя снижается до 0.6–0.8 — необходимых значений для получения производственной урожайности черники.

При выборочных рубках и рубках ухода со снижением полноты до 0.6 происходит повышение урожайности ягодника до 30% от продуктивности до рубки. Увеличение урожайности обусловлено тем, что для развития покрова черники требуется меньше света, чем для ее плодоношения, поэтому при более затененном пологе покров черники успешно развивается, а увеличение освещенности дает возможность плодоносить этим кустарникам, таким образом под пологом формируется оптимальный для ягодника све-

товой режим (Обыденников, Войтюк, 2007; Курлович и др., 2015). Повышение продуктивности наблюдается 5–7 лет, затем урожайность снижается до начального уровня в соответствии с текущим состоянием древостоя.

Брусника дает высокие урожаи на открытых местах. Способность к вегетативному возобновлению обосновывает восстановление покрова и производственной продуктивности в короткий срок после сплошных рубок. После сплошных рубок, проведенных в зимний период, брусника способна ежегодно плодоносить на промысловом уровне 6–8 лет, пока не сомкнется полог молодого леса. Такая динамика наблюдается из-за пробуждения спящих почек, увеличения ветвистости парциальных кустов, разрастания заросли, образования генеративных почек. Вырубки интенсивно зарастают злаковой растительностью и березой. Таким образом, вслед за резким увеличением урожайности и проективного покрытия брусники наступает период деградации брусничников, основная причина которого — изменение светового режима, что связано с процессами зарастания рубок. Далее только в преспевающих и спелых насаждениях после снижения полноты древостоя начинают формироваться участки для промышленного сбора ягодника (Курлович и др., 2015). Выборочные рубки благоприятно влияют на продуктивность ягодников, так как для

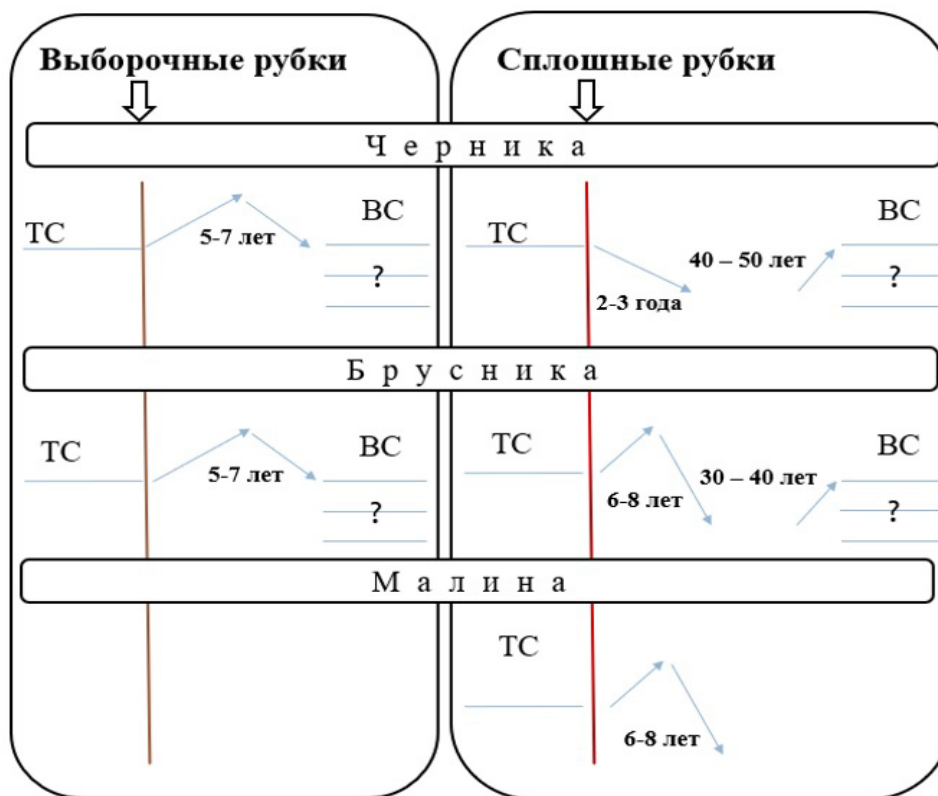


Рисунок 1. Влияние рубок на плодоношение ягодников

Примечания: ТС – текущее состояние, ВС – восстановленное состояние

плодоношения брусники благоприятна повышенная степень разреженности полога – 0.6–0.7 (Ключников, 2001).

Малина произрастает на открытых местах, поэтому влияние на ягодники оказывают сплошные рубки. На участках, пройденных рубками, происходит активное разрастание ягодников высокой продуктивности в течение 6–8 лет (Рай и др., 2020). Выборочные рубки могут увеличить продуктивность полкустарника при его произрастании под пологом в неплодоносящем состоянии, но промышленных урожаев в таких условиях не зафиксировано.

В качестве платформы для прогноза урожайности лесных ягод выбрана модель хода роста насаждений FORRUS-S, которая имитирует биоэкологические процессы, протекающие в лесных сообществах, используя справочные базы для основных лесобразующих пород деревьев: биометрические характеристики кроны, требовательность к свету, просветы в пологе, коэффициент пропускания света кроной, расстояние разноса семян, порослевая способность, возрастные поправки, определяющие онтогенетическое состояние, таблицы хода роста одно-

видовых насаждений, потенциальные бонитеты (Чумаченко, 1993, 2006 а; Чумаченко и др., 2004, 2008).

Шаг моделирования – 5 лет – выбран исходя из данных популяционной биологии о времени, за которое происходят заметные изменения темпов роста, развития и отношения древесных растений к свету в молодости. Моделируемая площадь от десятков гектаров до сотен тысяч.

Модель характеризуется трехмерным пространством моделируемых элементов и реализована в технике эколого-физиологического (объясняющего) имитационного моделирования. Программно FORRUS-S состоит из отдельных блоков: «Входные данные и параметры модели», «Сервисные программы», «Моделирование» (Chumachenko et al., 2003; Чумаченко, 2006 а; Чумаченко и др., 2007, 2008).

Входными данными модели FORRUS-S являются стандартные таксационные описания лесотаксационных выделов и планы лесных насаждений. Сервисные программы модели преобразуют исходную двухмерную «картинку» данных (планы лесонасаждений) в трехмерную. Преобразование исходной информации происходит в несколько этапов: 1) на планы лесонасаждений средствами используемой ГИС накладывается равномерная сетка, тем самым сложная конфигурация выделов в плане аппроксимиру-

ется набором квадратов – элементов (16.7 × 16.7 м); 2) затем плоские пространственные элементы достраиваются по вертикали прямоугольными параллелепипедами – ячейками высотой по 2.5 м: таким образом элементы моделирования становятся трехмерными; 3) каждому элементу присваиваются свойства выдела, которому он принадлежит: видовой (породный) и возрастной состав, средние высоты и диаметры для каждого элемента леса, запас, полнота, ТЛУ и пр.

Блок «Моделирование» состоит из двух субмоделей: «Естественное развитие» и «Экзогенные воздействия». Субмодель «Естественное развитие» насаждений имитирует существенные процессы, протекающие в лесных насаждениях: конкуренция за ресурсы, расчет прироста, спонтанное изреживание и естественное возобновление древостоя. Она включает в себя четыре субмодели: «Свет», «Прирост», «Изреживание» и «Естественное возобновление». В ходе моделирования прогнозируются изменение средних таксационных характеристик насаждений (высоты, диаметра, возраста, запаса и др.), изменение видového (породного) и возрастного состава каждого выдела (Паленова и др., 2001).

После очередного шага моделирования (5 лет) для каждого элемента леса рассчитываются видовой состав, число стволов на выделе, возраст,

средняя высота и средняя высота прикрепления кроны, средний диаметр, площадь проекции и форма кроны, достигнутый бонитет. Кроме того, рассчитываются сведения о запасе и полноте насаждения.

Эти данные являются основой для работы модели «Экзогенные воздействия», с помощью которой можно моделировать различные сценарии ведения лесного хозяйства. В процессе формирования сценариев лесопользования и лесопользования можно задавать различные объемы заготовки по группам пород при проведении сплошных и выборочных рубок, рубок ухода; менять интенсивность посадки лесных культур и их состав; вводить ограничения технического и экономического характера. Особенностью модели является то, что одновременно для различных частей моделируемой территории можно задать до 9 сценариев.

Таким образом, в рамках одного вычислительного эксперимента можно моделировать различные комбинации сценариев ведения лесного хозяйства: например, для части территории – режим естественного развития (экологический каркас, особо защитные участки), для другой части – экстенсивное лесопользование без посадки лесных культур, для третьей, четвертой и так далее – различные варианты интенсификации в зависимости от природных условий и транспортной доступности.

Модель верифицирована на 45-летнем ряду таксационных данных Приокско-Террасного заповедника Московской области по следующим параметрам: породный состав, запасы насаждений, распределение по ступеням толщин. Накопленная ошибка за этот период не превышает 15%.

Для расчета урожайности лесных ягодников в насаждении разработан дополнительный модуль «Пищевые ресурсы» модели FORRUS-S, который вместе с классическими характеристиками из таксационного описания (тип лесорастительных условий, преобладающая порода, возраст древостоя, полнота) учитывает освещенность на уровне напочвенного покрова. Схема устройства работа модели и дополнительного модуля представлена в работах Chumachenko et al., (2003, 2020).

В работу модели был заложен алгоритм вычисления световых характеристик древостоя. Расчет освещенности под пологом леса был выполнен на основе данных, собранных из «Таблиц хода роста нормальных древостоев» (Швиденко и др., 2008). Материалы представляют собой информацию о 2436 выделах для чистых насаждений основных лесобразующих древесных пород в различных возрастах, полнотах, бонитетах. Рассчитана освещенность выдела (относительно открытого места) на уровне напочвенного покрова с учетом всей раститель-

ности на выделе: первый, второй ярус, подрост и подлесок. Подробное описание методики вычисления световых характеристик и эксперимент по верификации представлены в диссертации С. И. Чумаченко (Чумаченко, 2006 б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставлена полнота модельных древостоев и освещенность (рассчитанная в модели) в чистопородных насаждениях. Вычислены значения для каждой древесной породы. Например, для ели и сосны освещенность при одинаковой полноте значительно различается. Изменения освещенности в зави-

симости от полноты насаждения представлены на рисунке 2. Исходя из этого, в различных породах при одинаковых полнотах освещенность на уровне напочвенного покрова значительно различается, при полноте 0.5 освещенность под пологом еловых насаждений составляет 16% от освещенности открытого места, сосновых и березовых 21 и 28% соответственно. Аналогичные тренды составлены для всех возрастов, пород и бонитетов. Благодаря полученным данным появилась возможность замены показателей полноты на освещенность и применение этого показателя для насаждений основных лесобразующих пород (Колычева, Чумаченко, 2020).

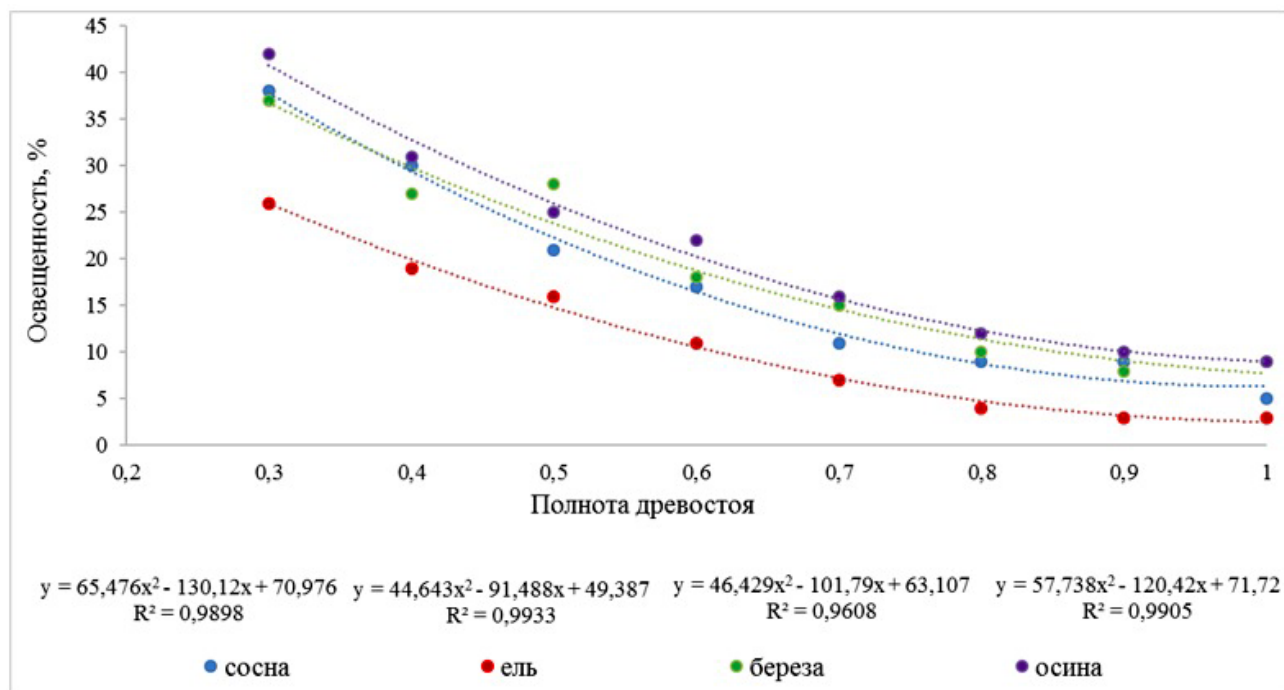


Рисунок 2. Зависимость освещенности от полноты для древостоев сосны (90 лет), ели (90), березы (60), осины (40)

Проанализированы имеющиеся данные урожайности черники, брусники и малины из «Таксационного справочника по лесным ресурсам России (за исключением древесины)». Зафиксированы урожайности ягодников для различных чистопородных древостоев сначала в зависимости от полноты. Затем значения полноты были заменены на рассчитанные выше показатели освещенности (рис. 2) и сопоставлены с урожайностью ягодников. На графиках рисунка 3 справочные значения урожайности ягодников представлены оранжевыми точками. После расстановки точек были обнаружены зависимости, результаты аппроксимации представлены на рисунке 3 черными точками

Тренды были сгруппированы для различных типов лесорастительных условий. Каждый ягодник имеет различные формы регрессионной зависимости, что обусловлено биологическими характеристиками кустарничка. Черничники имеют куполообраз-

ные параболические зависимости, что обусловлено ее предпочтениями к средней освещенности. Наиболее высокие урожаи достигаются при освещенности 15–27%. Освещенность ниже 8% не обеспечивает протекание жизненных процессов ягодника, света недостаточно для воспроизводства и плодоношения. При значениях освещенности более 35% кустарничек вытесняется светолюбивыми конкурентными видами.

Для брусничников графики представлены логарифмическими зависимостями. Производственную продуктивность возможно получить только в насаждениях с освещенностью более 25%, так как ягодник является светолюбивым и встречается в разреженных насаждениях, в которые под полог доходит до 80% света. Малинники являются самыми светолюбивыми ягодниками, начинают плодоносить при освещенности от 20% и повышают свою урожайность на открытых местах, где освещенность доходит до 100%.

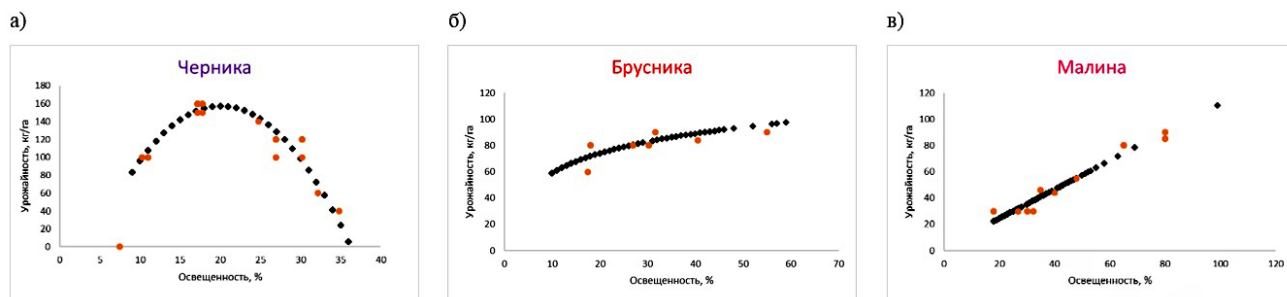


Рисунок 2. Тренды зависимости урожайности лесных ягод: а) черники, б) брусники, в) малины от освещенности на уровне напочвенного покрова

Примечание: оранжевые точки – справочные значения урожайности

Выведены уравнения зависимости урожайности лесных ягод от освещенности для модели FORRUS-S (табл. 2), где коэффициент детерминации от 0.7259 до 0.9563, что показывает сильную связь между значениями урожайности и освещенности. Условием для их применения является комплекс характеристик, при которых работа уравнений не противоречит экологическими лимитами произрастания ягодников: тип лесорастительных условий; порода; коэффициент состава; максимальный и минимальный возраст; максимальная и минимальная освещенности. Учитывая эту совокупность факторов, появляется возможность спрогнозировать урожайность ягодников при любом значении освещенности.

Вместе с прогнозом продуктивности ягодников в чистых насаждениях был разработан алгоритм вычисления урожайности в многовидовых разновозрастных насаждениях, которые составляют значительную часть лесов на территории России. Главной особенностью подхода является учет урожайности ягодников по доли участия каждой породы на выделе. Например, в насаждении состава 5ЕЗС2Б сначала рассчитывается продуктивность в чистых ельниках, затем сосняках и березняках. А затем рассчитывается участие каждой породы в формировании кустарничков и урожая ягод.

Так как на мозаичное распределение напочвенного покрова влияют кроны деревьев (Карпачевский, 1977; Крышень, 2006; Геникова, 2012), было

Таблица 2. Уравнения зависимости для расчета урожайности лесных ягод

Ягода	ТЛУ	ФАР, %	Возраст	Уравнения	R2
Черника	A3, B3, C3	9-36	>6	$Y = -0.6 \times FAR0^2 + 24.12 \times FAR0 - 85$	0.8123
	B2, C2	7-35	>6	$Y = -0.9 \times FAR0^2 + 41.5 \times FAR0 - 296$	0.8421
	A4, B4	10-35	>6	$Y = -0.3 \times FAR0^2 + 16.5 \times FAR0 - 68,9$	0.7722
Брусника	A2, B2	11-80	>7	$Y = 16.3 \times \ln(FAR0) - 14.3$	0.8869
	A3	10-80	>7	$Y = 27.1 \times \ln(FAR0) - 49$	0.7603
	B3, C3	10-80	>7	$Y = -21.7 \times \ln(FAR0) + 9.1$	0.7259
Малина	A2, A3	18-100	–	$Y = 0.8 \times FAR0 + 12.3$	0.8378
	B2, B3, B4	18-100	–	$Y = 1.1 \times FAR0 + 2.5$	0.9563
	C3, C4	18-100	–	$Y = 0.5 \times FAR0 + 97.8$	0.9323
	D2, D3, D4	18-100	–	$Y = 0.5 \times FAR0 + 105.5$	0.7923

Примечание: FAR0 – освещенность на уровне напочвенного покрова, рассчитанная в модели FORRUS-S

принято производить оценку влияния каждой породы в насаждении пропорционально площади кроны, а не запасу породы. Используемые в модели характеристики – порода, возраст, онтогенетическое состояние, габитус кроны и высота ее крепления – дают возможность определить площадь, занимаемую кроной всех деревьев на выделе, а затем и оценить, на какую площадь ягодников влияет каждая порода. После получения значений по урожаю под каждой породой значения суммируются и выдаются в килограммах на выдел.

Исходя из изложенного выше, ясно, что на продуктивность ягодников влияют все компоненты лесного сообщества, поэтому в моделирование включены имеющиеся на лесном участке подрост и подлесок. Входными данными для учета подрост являются следующие характеристики: количество на выделе, высота, возраст и порода, а для подлеска – породный состав, густота. Эта информация позволяет включать подрост и подлесок в расчеты освещенности на уровне напочвенного покрова. С учетом этих корректировок можно получить наиболее точные прогнозы урожайности, так как учтены все компоненты растительного сообщества, оказывающие влияние на продуктивность ягодников.

ВЫВОДЫ

Необходимость разработки алгоритма расчета урожайности ягод на лесном участке обусловлена мировой тенденцией перехода на мультифункциональное лесопользование, ключевой идеей которого является сохранение баланса между всеми экосистемными услугами. Долгосрочность стратегического планирования в лесном хозяйстве определяет необходимость применения методов математического моделирования. Российская модель FORRUS-S позволяет производить долгосрочное прогнозирование производственной продуктивности ягодников.

Проанализированы факторы, влияющие на урожайность лесных ягодников. Выявлена совокупность характеристик, определяющих возможность получения производственной продуктивности. В комплекс определяющих урожайность факторов входят лесная зона, ТЛУ, порода, возраст, полнота, освещенность. Дополнительный фактор – освещенность на уровне напочвенного покрова – позволяет учесть влияние не только полноты древесного яруса, но и всех компонентов лесного фитоценоза. Такой подход особенно актуален на территории России, так как большая часть территории представлена многовидовыми разновоз-

зрастными насаждениями, а также насаждениями с подростом и подлеском.

Предложенный метод позволяет более точно определять продуктивность ягодников. Используя имеющиеся на территории европейской части России справочники, основанные на многолетних измерениях, составлены уравнения для определения урожайности ягодников в чистых насаждениях. Выполнен переход от полноты к освещенности как лимитирующему фактору продуктивности ягодников. Освещенность является входной переменной для прогноза урожайности ягодников. Уравнения, полученные в результате работы, универсальны для различных лесных пород и возрастов при соблюдении комплекса факторов: ТЛУ, возраст.

Выстроен алгоритм работы модели с многовидовыми разновозрастными

насаждениями. Добавлен расчет доли влияния каждой породы на ягодники. Вместе со сложной структурой древостоя учтено влияние на продуктивность ягодников подростом и подлеском, так как освещенность на уровне напочвенного покрова вычислена с учетом всех компонентов лесного сообщества. Это позволяет оценить продуктивность ягодников в многовидовых разновозрастных насаждениях с подростом и подлеском, которые широко распространены на территории европейской части России.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках темы ГЗ ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» (номер государственной регистрации АААА-А18-118052400130-7).

ЛИТЕРАТУРА

Астрологова Л. Е. Влияние экологических факторов среды на плодоношение черники // Известия ВУЗов. Лесной журнал. 1999. № 2-3. С. 36-40.
Брусника: морфология и анатомия. Фитоценотическая приуроченность. Урожайность. Хранение и переработка. Химический состав ягод / В. Ф. Юдина, Т. В. Белоногова, К. Г. Колупаева и др. Москва: Лесная промышленность, 1986. 78 с.

Геникова Н. В. Изменения структуры напочвенного покрова в сосняках черничных разного возраста и полноты // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. № 1-5. С. 1-5.

Дулина А. А., Чумаченко С. И. Обзор моделей оценки пищевых ресурсов лесов центральной части России // Вопросы лесной науки. 2018. № 1. С. 1-22.

- Дулина А. А., Чумаченко С. И. Обоснование учета освещенности для моделирования пищевых ресурсов лесов Центральной части России // Доклады VII Всероссийской конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии». М.: ЦЭПЛ РАН, 2019. С. 123–125.
- Егошина Т. Л. Эколого-биологические особенности некоторых лекарственных растений Кировской области / Современное состояние недревесных растительных ресурсов России. Киров, 2003. С. 162–177.
- Егошина Т. Л. Недревесные растительные ресурсы России и их использование // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2007. № 2. С. 104–111.
- Залесов С. В., Панин И. А. Ресурсы ягодных кустарничков в ельнике мшистом Североуральской среднегорной лесорастительной провинции // Лесной вестник. 2017. Т. 21. № 1. С. 21–27.
- Казанцева М. Н., Мирямина Л. Р. Плодоношение малины обыкновенной (*Rubus idaeus* L.) в лесах на юге тюменской области // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2017. № 47. С. 1–4.
- Карпачевский Л. О. Пестрота почвенного покрова в лесном биогеоценозе. Изд-во Моск. ун-та. 1977. 312 с.
- Ключников Л. Ю., Ключников И. Л. Лесоводственное содействие промышленному воспроизводству брусники и грибов в борах и субориях // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2001. № 2. С. 55–58.
- Колычева А. А., Чумаченко С. И. Долгосрочный прогноз урожайности лесных ягод при различных видах рубок // Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием Научные основы устойчивого управления лесами. М.: ЦЭПЛ РАН, 2020. С. 55–57.
- Коновеева А. Б. Биоэкологические и фитоценотические закономерности развития черники обыкновенной в условиях Тамбовской области // АГРО XXI «Агрорус» (Москва). 2007. № 10–12. С. 27–28.
- Крышень А. М., Рудковская О. А., Преснухин Ю. В., Тимофеева В. В. Морфоструктура напочвенного покрова основных типов лесных сообществ заповедника «Кивач» (средняя тайга) // Труды КарНЦ РАН. 2006. № 10. С. 54–61.
- Курлович Л. Е., Косицын В. Н. Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины). Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 281 с.
- Курлович Л. Е., Панков В. Б., Кивилева И. М. Влияние лесохозяйственной деятельности на состояние и продуктивность пищевых и ле-

- карственных растений // Лесохозяйственная информация. 2015. № 2. С. 24–33.
- Лукина Н. В. Глобальные вызовы и лесные экосистемы // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 6. С. 528–532.
- Малиновских А. А. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность брусники в условиях Среднеобского бора Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. Т. 4. № 138. С. 105–109.
- Малиновских А. А. Влияние уровня освещенности под пологом леса на урожайность черники в условиях Среднеобского бора Алтайского края // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. Т. 6. № 152. С. 87–92.
- Обыденников В. И., Войтюк М. М. Сохранение, восстановление и повышение продуктивности ресурсов ягодников в связи с рубками главного промежуточного пользования // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. 2007. № 4. С. 6–13.
- Обыденников В. И., Ключников Л. И. Проблема сохранения, возобновления и повышения продуктивности ценопопуляций ягодников в связи с лесоводственными системами // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. 1998. № 3. С. 89–98.
- Паленова М. М., Коротков В. Н., Чумаченко С. И. Прогноз динамики таксационных показателей лесных насаждений при разных сценариях ведения лесного хозяйства: оценка изменения биоразнообразия и экологических характеристик лесного фонда // Научные труды Московского государственного университета леса. 2001. С. 164–174.
- Рай С. А., Беляева Н. В., Наквасина Е. Н. Формирование древесного яруса и напочвенного покрова на вырубках с разной технологией лесовосстановления в Кировской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 230. С. 36–53.
- Раус Л. К. К методике фенологического прогнозирования урожая черники // Вопросы индикационной фенологии и фенологического прогнозирования (материалы 7 и 8 совещаний актива фенологов Географического общества СССР). Ленинград. 1972. С. 181–188.
- Сергиенко В. Г., Соколова О. И. Динамика живого напочвенного покрова и естественное лесовозобновление на вырубках // Известия вузов. Лесной журнал. 2012. № 2. С. 35–41.
- Телишевский Д. А. Комплексное использование недревесной продукции леса. 2-е изд. Москва: Лесная промышленность. 1986. 261 с.

- Тимошок Е. Е., Скороходов С. Н. Оценка ягодных ресурсов видов семейства брусничных Томской области, их рациональное использование и охрана // Сибирский лесной журнал. 2019. № 4. С. 80–88.
- Цыганов Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 196 с.
- Черкасов А. Ф., Шутков В. В., Миронов К. А. Восстановление зарослей брусники и черники после сплошных рубок // Лесоведение. 1988. № 4. С. 42–48.
- Чумаченко С. И. Базовая модель динамики многовидового разновозрастного лесного ценоза // Научные труды Московского государственного университета леса. Вып. 248. 1993. С. 147–180.
- Чумаченко С. И. Концепция построения биоэкологических моделей многовидовых разновозрастных лесных насаждений для зоны хвойно-широколиственных лесов и южной тайги // Лесной вестник. 2006 а. № 2. С. 7–13.
- Чумаченко С. И. Имитационное моделирование многовидовых разновозрастных насаждений. Дисс. ... докт. биол. наук (спец. 03.00.16 – экология). М: МГУЛ, 2006 б. 297 с.
- Чумаченко С. И., Паленова М. М., Коротков В. Н. Прогноз динамики таксационных показателей лесных насаждений при разных сценариях ведения лесного хозяйства / Восточноевропейские леса: История в голоцене и современность. О. В. Смирнова (ред.). Т. 2. М.: Наука, 2004. С. 492–506.
- Чумаченко С. И., Паленова М. М., Коротков В. Н., Починков С. В. Имитационное моделирование влияния лесохозяйственных воздействий на лесные экосистемы / Мониторинг биологического разнообразия лесов России: методология и методы. А. С. Исаев (отв. ред.). ЦЭПЛ РАН. М. Наука, 2008. С. 314–328.
- Чумаченко С. И., Паленова М. М., Починков С. В., Кухаркина Е. В. Имитационное моделирование динамики насаждений. FORRUS-S – инструмент выбора стратегии и планирования лесного хозяйства // Лесной вестник. 2007 № 5. С. 143–152.
- Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии (нормативно-справочные материалы). М.: Федеральное агентство лесного хозяйства, 2006. 803 с.
- Ярославцев А. В. Морфологические особенности черники обыкновенной, произрастающей в разных типах лесных фитоценозов южной тайги // Современные проблемы природопользования, охотоведения и звероводства. 2007. № 1. С. 498–499.

- Chumachenko S. I., Korotkov V. N., Palenova M. M., Politov D. V.* Simulation modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous-broad-leaved forests // *Ecological Modelling*. Vol. 170. 2003. P. 345–361.
- Chumachenko S., Kiseleva V., Kolycheva A., Mitrofanov E.* Modeling of multiple forest use under different management scenarios // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2020. Vol. 574. P. 1–9.
- Hynynen J., Ahtikoski A., Siitonen J., Sievaonen R., Liski J.* Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production // *Forest Ecology and Management*. 2005. Vol. 207. No. 1–2. P. 5–18.
- Hynynen J., Ojansuu R.* Impact of plot size on individual tree competition measures for growth and yield simulators // *Canadian Journal of Forest Research*. 2003. Vol. 33. No. 3. P. 455–465.
- Ihalainen M., Salo K., Pukkala T.* Empirical prediction models for *Vaccinium myrtillus* and *V. vitis-idaea* berry yields in North Karelia // *Silva Fennica*. 2003. Vol. 37 No. 1. P. 95–108.
- Landolt E.* Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora // *Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rubel, Zurich*. 1977. Vol. 64. 208 p.
- Miina J., Hotanen J.-P., Salo K.* Modelling the abundance and temporal variation in the production of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) in Finnish mineral soil forests // *Silva Fennica*. 2009. Vol. 43. No. 4. P. 577–593.
- Miina J., Pukkala T., Hotanen J.-P., Salo K.* Optimizing the joint production of timber and bilberries // *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259. Issue 10. P. 2065–2071.
- Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis*. USA, Washington: Island Press. 2005. URL: <http://www.millenniumassessment.org/en/Reports.aspx#> (2021, 30 October).
- Pohjanmies A., Jašková J.-P., Hotanen O., Manninen M., Salemaa A., Tolvanen P., Merilä P.* Abundance and diversity of edible wild plants in managed boreal forests // *Forest Ecology and Management*. 2021. № 491. P. 119–151.
- Sheppard J. P., Chamberlain J., Agúndez D., Bhattacharya P., Chirwa P. W., Gontcharov A., Sagona W. G., Shen H., Tadesse W., Mutke S.* Sustainable Forest Management Beyond the Timber-Oriented Status Quo: Transitioning to Co-production of Timber and Non-wood Forest Products – a Global Perspective // *Current Forestry Reports*. 2020. No. 6. P. 26–40.

- Turtiainen M., Miina J., Salo K., Hotanen J.-P.* Empirical prediction models for coverage and yields of cowberry in Finland // *Silva Fennica*. 2013. Vol. 47. No. 3. P. 22.
- Turtiainen M., Miina J., Salo K., Hotanen J.-P.* Modelling the coverage and annual variation in bilberry yield in Finland // *Silva Fennica*. 2016. Vol. 50. No. 4. P. 12.
- Turtiainen M., Salo K., Saastamoinen O.* Model-based estimates of regional and national bilberry and lingonberry yields on mineral soils in Finland // University of Joensuu: Faculty of Forestry. Research Notes. 2005. 44 p.
- Wolfslehner B., Prokofieva I., Mavsar R., Asamer-Handler M, Bonet J., ... & Živojinović I.* Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees – What Science Can Tell Us. European Forest Institute. Joensuu, Finland 2019. 117 p.
- REFERENCES**
- Astrologova L. E., Vlijanie ekologičeskikh faktorov sredy na plodonoshenie cherniki (Influence of environmental factors of the environment on the fruiting of blueberries), *Izvestija vuzov. Lesnoj zhurnal*, 1999, No. 2-3, pp. 36-40.
- Cherkasov A. F., Shutov V. V., Mironov K. A., Vosstanovlenie zaroslej brusniki i cherniki posle sploshnyh rubok (Restore thickets of lingonberry and blueberry after clear Cutting), *Lesovedenie*, 1988, No. 4, pp. 42-48.
- Chumachenko S., Kiseleva V., Kolycheva A., Mitrofanov E., Modeling of multiple forest use under different management scenarios, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, Vol. 574, pp. 1-9. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012011.
- Chumachenko S. I., *Bazovaja model' dinamiki mnogovidovogo raznovozrastnogo lesnogo cenoza* (The basic model of the dynamics of multiple species of different age forest cenosis), Moscow: MLTI, 1993, No. 248, pp. 147-180.
- Chumachenko S. I., *Imitacionnoe modelirovanije mnogovidovyh raznovozrastnyh nasazhdenij*, Diss. dokt. biol. nauk (Simulation modeling of multi-species plantations of different ages. Dissertation of doctor of biol. sci.), Moscow: MGUL, 2006, 297 p.
- Chumachenko S. I., *Koncepcija postroenija bioekologičeskikh modelej mnogovidovyh raznovozrastnyh lesnyh nasazhdenij dlja zony hvojno-shirokolistvennyh lesov i južnoj tajgi* (The concept of constructing bioecological models of multi-species multi-age forest stands for the zone of coniferous-deciduous forests and the southern taiga), *Lesnoj vestnik*, 2006, No. 2, pp. 7-13.
- Chumachenko S. I., Korotkov V. N., Pálnova M. M., Politov D. V., Simula-

- tion modelling of long-term stand dynamics at different scenarios of forest management for coniferous-broad-leaved forests, *Ecological Modelling*, 2003, Vol. 170, No. 2-3, pp. 345-361.
- Chumachenko S. I., Palenova M. M., Korotkov V. N., Prognoz dinamiki taksacionnyh pokazatelej lesnyh nasazhdenij pri raznyh scenarijah vedenija lesnogo hozjajstva (Forecast of the dynamics of taxation indicators of forest plantations under different scenarios of forestry), In: *Vostochno-evropejskie lesa: Istorija v golocene i sovremennost'* (Forests of eastern Europe: holocene history and modern times), O. V. Smirnova (ed.), Moscow: Nauka, 2004, Vol. 2, pp. 492-506.
- Chumachenko S. I., Palenova M. M., Korotkov V. N., Pochinkov S. V., Imitacionnoe modelirovanie vlijanija lesohozjajstvennyh vozdeystvij na lesnye jekosistemy (Simulation modeling of the impact of forestry impacts on forest ecosystems), In: *Monitoring biologicheskogo raznoobrazija lesov Rossii: metodologija i metody* (Monitoring of biological diversity of Russian forests: methodology and methods), Isaev A. S. (ed.), Moscow: Nauka, 2008, pp. 314-328.
- Chumachenko S. I., Palenova M. M., Pochinkov S. V., Kuharkina E. V., Imitacionnoe modelirovanie dinamiki nasazhdenij. FORRUS-S – instrument vybora strategii i planirovanija lesnogo hozjajstva (Simulation modeling of the dynamics of plantings. FORRUS-S – a tool for choosing a strategy and planning forestry), *Lesnoj vestnik*, 2007, No. 5, pp. 143-152.
- Cyganov D. N., *Fitoindikacija ekologicheskikh rezhimov v podzone hvojno-shirokolistvennyh lesov* (Phytoindication of ecological regimes in the subzone of coniferous-broad-leaved forests), Moscow: Nauka, 1983, 196 p.
- Dulina A. A., Chumachenko S. I., Obzor modelej ocenki pishchevyh resursov lesov central'noj chasti Rossii (Review of models of estimation of food resources of forests of the central part of Russia), *Voprosy lesnoj nauki*, 2018, No. 1, pp. 1-22.
- Dulina A. A., Chumachenko S. I., Obosnovanie ucheta osveshennosti dlja modelirovanija pishchevyh resursov lesov Central'noj chasti Rossii (Justification of accounting of lighting for modeling the food resources of forests of the central part of Russia). *Doklady VII Vserossijskoj konferencii Ajerokosmicheskie metody i geoinformacionnye tehnologii v lesovedenii, lesnom hozjajstve i ekologii* (Aerospace methods and GIS-technologies in forestry, Forest Management and Ecology: Proceedings of the VII All-Russian Conference), Moscow: CEPF RAN, 2019, pp. 123-125.
- Egoshina T. L., Ekologo-biologicheskie osobennosti nekotoryh lekarstvennyh

- rastenij Kirovskoj oblasti (Ecological and biological features of some medicinal plants of the Kirov region), *Sovremennoe sostojanie nedrevesnyh rastitel'nyh resursov Rossii* (The current state of non-wood plant resources in Russia), Kirov, 2003, pp. 162–177.
- Egoshina T. L., Nedrevesnye rastitel'nye resursy Rossii i ih ispol'zovanie (Non arboreal resources of Russia and their use), *Ispol'zovanie i ohrana prirodnyh resursov v Rossii*, 2007, No. 2, pp. 104–111.
- Genikova N. V., Izmenenija struktury napochvennogo pokrova v sosnjakah chernichnyh raznogo vozrasta i polnoty (Changes in the ground cover structure in bilberry pine stands of different age and stocking density), *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN*, 2012, No. 1–5. pp. 1–5.
- Hynynen J., Ahtikoskib A., Siitonen J., Sievaonen R., Liski J., Applying the MOTTI simulator to analyse the effects of alternative management schedules on timber and non-timber production, *Forest Ecology and Management*, 2005, Vol. 207, No. 1–2. pp. 5–18.
- Hynynen J., Ojansuu R., Impact of plot size on individual tree competition measures for growth and yield simulators, *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, Vol. 33, No. 3, pp. 455–465.
- Ihalainen M., Salo K., Pukkala T., Empirical prediction models for *Vaccinium myrtillus* and *V. vitis-idaea* berry yields in North Karelia, *Silva Fennica*, 2003, Vol. 37, No. 1, pp. 95–108.
- Judina V. F., Belonogova T. V., Kolupajeva K. G. et al., *Brusnika: morfologija i anatomija. Fitocenoticheseskaja priurochennost'. Urozhajnost'. Hranenie i pererabotka. Himicheskij sostav jagod* (Lingonberry: morphology and anatomy. Phytocenotic confinement. Productivity. Storage and processing. The chemical composition of berries), Moscow: Lesnaja promyshlennost', 1986. 78 p.
- Karpachevskij L. O., *Pestrota pochvennogo pokrova v lesnom biogeocenoze* (Diversity of soil cover in the forest biogeocenosis), Izd-vo Mosk. un-ta, 1977. 312 p.
- Kazanceva M. N., Mir'jaminova L. R., Plodonoshenie maliny obyknovennoj (*Rubus idaeus L.*) v lesah na juge Tjumenskoj oblasti (Fruiting of red raspberry (*Rubus Idaeus L.*) in the forests of the south part of the Tyumen region), *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2017, No. 47, pp. 1–4.
- Kljuchnikov L. Ju., Kljuchnikov I. L., Lesovodstvennoe sodejstvie promyslovomu vosproizvodstvu brusniki i gribov v borah i suborjah (Forestry assistance to commercial reproduction of red bilberry and mushrooms in forests and sub-forests), *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 2001, No. 2, pp. 55–58.

- Kolycheva A. A., Chumachenko S. I., Dolgosrochnyj prognoz urozhajnosti lesnyh jagod pri razlichnyh vidah rubok (Long-term forecast of the yield of forest berries at various fellings) *Materialy IV Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem Nauchnye osnovy ustojchivogo upravlenija lesami* (3th All-Russia Science Conference with international participation Scientific basis for sustainable forest management), M.: CEPF RAN, 2020, pp. 55-57.
- Konobeeva A. B., Biojekologicheskie i fitocenoticheskie zakonomernosti razvitija cherniki obyknovennoj v usloviyah Tambovskoj oblasti (Bioecological and phytocenotic patterns of the development of blueberries in the Tambov region), *AGRO XXI "Agrorus" (Moskva)*, 2007, No. 10-12, pp. 27-28.
- Kryshen' A. M., Rudkovskaja O. A., Presnuhin Ju. V., Timofeeva V. V., Morfostruktura napochvennogo pokrova osnovnyh tipov lesnyh soobshhestv zapovednika "Kivach" (srednjaja tajga) (Morphostructure of the ground cover in major forest community types in the "Kivach" strict nature reserve (middle taiga)), *Trudy KarNC RAN*, 2006, No. 10, pp. 54-61.
- Kurlovich L. E., Kositsyn V. N., *Taksacionnyj spravocnik po lesnym resursam Rossii (za iskljucheniem drevesiny)* (Russian forest resources inventory reference book (excluding timber)), Pushkino: VNIILM, 2018, 281 p.
- Kurlovich L. E., Pankov V. B., Kivileva I. M., Vlijanie lesohozjajstvennoj dejatel'nosti na sostojanie i produktivnost' pishhevyyh i lekarstvennyh rastenij (The impact of forestry activities on the state and productivity of food and medicinal plants), *Lesohozjajstvennaja informacija*, 2015, No. 2, pp. 24-33.
- Landolt E., *Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora, Veröffentlichungen des Geobotanischen Instituts der ETH, Stiftung Rubel, Zurich*, 1977, Vol. 64, pp. 208.
- Lukina N. V., Global'nye vyzovy i lesnye jekosistemy (Global challenges and forest ecosystems), *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*, 2020, Vol. 90, No. 6, pp. 528-532.
- Malinovskih A. A., Vlijanie urovnja osveshennosti pod pologom lesa na urozhajnost' brusniki v usloviyah Sredneobskogo bora Altajskogo kraja (The effect of illumination level under forest canopy on cowberry yield under the conditions of the Sredne-Obsskiy pine forest of the Altai region), *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2016, Vol. 4, No. 138, pp. 105-109.
- Malinovskih A. A., Vlijanie urovnja osveshennosti pod pologom lesa na urozhajnost' cherniki v usloviyah Sredneobskogo bora Altajskogo kraja (Possession of the lightness of illumi-

- nation under the forest canopy on the yield of blueberries in the conditions of the Middle Ob forest of the Altai Territory), *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, Vol. 6, No. 152, pp. 87–92.
- Miina J., Hotanen J.-P., Salo K., Modelling the abundance and temporal variation in the production of bilberry (*Vaccinium myrtillus L.*) in Finnish mineral soil forests, *Silva Fennica*, 2009, Vol. 43, No. 4, pp. 577–593.
- Miina J., Pukkala T., Hotanen J.-P., Salo K., Optimizing the joint production of timber and bilberries, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 259, Iss. 10, pp. 2065–2071.
- Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis*. USA, Washington: Island Press. 2005, URL: <http://www.millenniumassessment.org/en/Reports.aspx#> (2021, 30 October)
- Obydennikov V. I., Ključnikov L. I., Problema sohraneniya, vozobnovleniya i povysheniya produktivnosti cenopopuljacij jagodnikov v svyazi s lesovodstvennymi sistemami (The problem of preserving, renewing and increasing the productivity of berry coenopopulations in connection with silvicultural systems), *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 1998, No. 3, pp. 89–98.
- Obydennikov V. I., Vojtjuk M. M., Sohranenie, vosstanovlenie i povyshenie produktivnosti resursov jagodnikov v svyazi s rubkami glavnogo promezhutochnogo pol'zovanija (Conservation, restoration and increase of productivity of berry resources in connection with felling of main intermediate use), *Vestnik MGUL – Lesnoj vestnik*, 2007, No. 4, pp. 6–13.
- Palenova M. M., Korotkov V. N., Chumachenko S. I., Prognoz dinamiki tak-sacionnyh pokazatelej lesnyh nasazhdenij pri raznyh scenarijah vedenija lesnogo hozjajstva: ocenka izmeneniya bioraznoobrazija i jekologicheskikh harakteristik lesnogo fonda (Forecast of the dynamics of taxation indicators of forest plantations under different scenarios of forestry: assessment of changes in biodiversity and ecological characteristics of the forest fund), *Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa*, 2001, Vol. 314, pp. 164–174.
- Pohjanmies A., Jašková J.-P., Hotanen O., Manninen M., Salemaa A., Tolvanen P., Merilä Abundance and diversity of edible wild plants in managed boreal forests, *Forest Ecology and Management*, 2021, No. 491, pp. 119–151.
- Raj S. A., Beljaeva N. V., Nakvasina E. N., Formirovanie drevesnogo jarusa i napochvennogo pokrova na vyrubkah s raznoj tehnologiej lesovosstanovleniya v Kirovskoj oblasti (The initial stages of succession in cutting areas with different technologies for reforestation in the Kirov region), *Izvestija*

- Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoi akademii*, 2020, No. 230, pp. 36–53.
- Raus L. K., *K metodike fenologicheskogo prognozirovanija urozhaev cherniki* (To the method of phenological forecasting of blueberry yields), *Voprosy indikacionnoj fenologii i fenologicheskogo prognozirovanija* (materials 7 i 8 soveshhanij aktiva fenologov Geograficheskogo obshhestva SSSR), Leningrad, 1972, pp. 181–188.
- Sergienko V. G., Sokolova O. I., *Dinamika zhivogo napochvennogo pokrova i estestvennoe lesovozobnovlenie na vyrubkah* (Dynamics of ground vegetation cover and natural reforestation in the cut-over areas), *Izvestija vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2012, No. 2, pp. 35–41.
- Sheppard J. P., Chamberlain J., Agúndez D., Bhattacharya P., Chirwa P. W., Gontcharov A., Sagona W. G., Shen H., Tadesse W., Mutke S., *Sustainable Forest Management Beyond the Timber-Oriented Status Quo: Transitioning to Co-production of Timber and Non-wood Forest Products – a Global Perspective*, *Current Forestry Reports*, 2020, No. 6, P. 26–40.
- Shvidenko A. Z., Shhepashhenko D. G., Nil'sson S., Buluj Ju. I., *Tablicy i modeli hoda rosta i produktivnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazujushchih porod Severnoj Evrazii (normativno-spravochnye materialy)* (Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo hozyajstva, 2006, 803 p.
- Telishevskij D. A., *Kompleksnoe ispol'zovanie nedrevesnoj produkcii lesa* (Integrated use of non-timber forest products), Moscow: Lesnaja promyshlennost', 1986, 261 p.
- Timoshok E. E., Skorohodov S. N., *Ocenka jagodnyh resursov vidov semejstva brusnichnyh Tomskoj oblasti, ih racional'noe ispol'zovanie i ohrana* (Evaluation of berry resources of the red bilberry family species in Tomsk Oblast, their rational use and protection), *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2019, No. 4, pp. 80–88.
- Turtiainen M., Miina J., Salo K., Hotanen J.-P., *Empirical prediction models for the coverage and yields of cowberry in Finland*, *Silva Fennica*, 2013, Vol. 47, No. 3, pp. 1–22.
- Turtiainen M., Miina J., Salo K., Hotanen J.-P., *Modelling the coverage and annual variation in bilberry yield in Finland*, *Silva Fennica*, 2016, Vol. 50, No. 4, pp. 1–12.
- Turtiainen M., Salo K., Saastamoinen O., *Model-based estimates of regional and national bilberry and lingonberry yields on mineral soils in Finland*, Finland: Research Notes, 2005, 44 p.
- Wolfslehner B., Prokofieva I., Mavsar R., Asamer-Handler M., Bonet J. ... & Živojinović I., *Non-wood forest products in Europe: Seeing the forest around the trees. What Science Can*

Tell Us. Joensuu: European Forest Institute, 2019, 117 p.

Zalesov S. V., Panin I. A., Resursy jagodnyh kustarnichkov v el'nike mshistom Severoural'skoj srednegornoj lesorastitel'noj provincii (Resources of berry shrubs in mossy spruce forests of the northern ural middle mountains forest province), *Lesnoj vestnik*, 2017, Vol. 21, No. 1, pp. 21–27.

Yaroslavcev A. V., Morfologicheskie osobennosti cherniki obyknovennoj, proizrastajushhej v raznyh tipah lesnyh fitocenzov juzhnoj tajgi (Morphological features of common blueberries growing in different types of forest phytocenoses of the southern taiga), *Sovremennye problemy prirodopol'zovanija, ohotovedenija i zverovodstva*, 2007, No. 1, pp. 498–499.

ESTIMATION OF THE YIELD OF WILD BERRIES TAKING INTO ACCOUNT THE LEVEL OF ILLUMINATION OF THE GROUND COVER BY SIMULATION METHODS

A. A. Kolycheva¹, S. I. Chumachenko²

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997, Russia

²MB of Bauman Moscow State Technical University
1st Institutskaya street, 1, Mytischì, Moscow region, 141005, Russia

E-mail: anna_dulina@bk.ru

Received: 18.10.2021

Revised: 10.11.2021

Accepted: 19.11.2021

Relevance and purpose. Currently known methods of accounting for berry yields are not applicable for multi-species forests of different ages with the presence of undergrowth and undergrowth, widespread in Russia. Difficulties arise due to a set of input parameters, including type of forest growing conditions, breed, age, completeness, but not describing the illumination at the level of the grass-shrub layer, which is the determining factor in the yield of blueberries, cranberries, raspberries. The purpose of this study is to develop an approach to calculating the yield of wild berries, taking into account the illumination at the ground cover level by simulation methods.

Material and methods. For the forecast, the FORRUS-S model of forest plantation dynamics is used. The yield data is taken from an existing reference book, which shows productivity in clean plantations without undergrowth and undergrowth. The use of an additional predictor of berry yield, namely, illumination at the level of ground cover, made it possible to predict yields in forests of a more complex structure: multi-species, of different ages, with undergrowth and undergrowth.

Results and conclusion. An original approach to calculating the yield of wild berries has been developed. The above approach allows us to estimate the yield of the most common berries in the European part of Russia: blueberries, raspberries, lingonberries. Universal equations have been obtained that make it possible to predict the productivity of berry bushes based on the taxation characteristics of the stand and the illumination calculated in the model.

Key words: : multifunctional forest management, modeling of the yield of forest berries, forest berries, illumination, yield

Рецензент: К. Б. Н. Фролов П. В.