

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ЛУЧШИХ ПО РОСТУ ПОПУЛЯЦИЙ СОСНЫ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КУЛЬТУРАХ

В.М. Ефимов^{1,2}, В.В. Тараканов³, Р.В. Роговцев⁴

¹Институт систематики и экологии животных СО РАН

²Институт цитологии и генетики СО РАН

630090 Новосибирск, Академгородок, пр. Академика Лаврентьева, 10; e-mail: vmefimov@ngs.ru

³Западно-Сибирский филиал Института леса СО РАН

630082, Новосибирск, ул. Жуковского, 100/1; e-mail: tarhan8@mail.ru

⁴Филиал ФГУ «Рослесозащита» ЦЗЛ Новосибирской области¹

630015, Новосибирск. Ул. Гоголя, 221; e-mail: rvr79@mail.ru

Изучена эффективность «ранней диагностики» быстрорастущих климатипов в 30 - летних географических культурах сосны в Новосибирской области. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения методов многомерной статистики для решения такого рода задач. Показано, что на определенных этапах онтогенеза годовичные приросты как по высоте, так и по диаметру могут достоверно коррелировать с высотой климатипов в 30 лет. Включение этих «маркерных» приростов в селекционный индекс может существенно повысить вероятность прогноза лучших популяций. Подтверждено, что отбор лучших вариантов по высоте ствола более эффективен и может осуществляться в более раннем возрасте, чем по диаметру.

Ключевые слова: географические культуры сосны, годовичные приросты древесины, ранняя диагностика, многомерный анализ

Efficiency of “early diagnostics” fast-growing climatypes in 30 - years Scots pine provenance trial in Novosibirsk region is studied. The received results testify to perspectives of using of methods of multivariate statistics for the decision of such problems. It is shown, that at the certain stages ontogenesis height and radial increments can authentically correlate with trunk height of climatypes in 30 years. Inclusion of these «markers» increments in a selection index can essentially raise probability of the diagnostics of the best populations. It is confirmed, that selection of the best variants on height of a trunk is more effective and can be carried out at earlier age, than on diameter of a trunk

Key words: provenance trial of Scots pine, height and radial increments of wood, early diagnostics, the multivariate analysis

ВВЕДЕНИЕ

В лесной селекции в связи с длительным жизненным циклом древесных растений одной из актуальных является проблема ранней диагностики лучших по росту генотипов и популяций. Согласно «Указаниям по лесному семеноводству ...» (2000) поэтапная оценка и отбраковка худших плюсовых деревьев и географических популяций по данным испытания их семенных потомств начинаются со II класса возраста, окончательная оценка осуществляется в возрасте потомств не менее ½ возраста рубки главного пользования. Однако в многочисленных публикациях по этой теме высказываются различные мнения. Например, рекомендуемый минимальный возраст оценки потомств варьирует от 3-5 (Рогозин, 1983; Ворончихин и др., 1991) до 15-20 лет (Долголиков, 1974; Веняляйнен, 1990; Молотков, Патлай, 1990; Ефимов, 1991). Исходя из «закона рангового роста» древостоев (Маслаков, 1984), можно предположить, что в условиях внутривидовой конкуренции диагностика «лидеров» достаточно надежна по завершению периода кульминации прироста культур по высоте (Тараканов и др., 2001). Удобным модельным объектом для изуче-

ния изменчивости по динамике роста и оценки эффективности диагностики лидирующих деревьев и популяций на тех или иных стадиях их онтогенеза являются географические культуры.

Цель настоящей работы – анализ эффективности ранней диагностики лидирующих по росту популяций (климатипов)¹ сосны на основе изучения динамики её роста в 30 - летних географических культурах и применения методов многомерной статистики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования служили географические культуры сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., произрастающие в условиях Среднеобского бора в Сузунском лесничестве Новосибирской области. Культуры созданы в 1975 г. потомствами 37 географических популяций из различных районов бывшего СССР. Исследования проведены в 2005 г., в возрасте культур 30 лет. Методика создания, таксационная характеристика культур и описание мест происхождения испытываемых популяций

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 53

¹ В настоящей работе термины «географическая популяция», «климатип» и «происхождение» употребляются как синонимы

подробно описаны ранее (Роговцев и др., 2008).

Измерение годовых приростов древесины по высоте и диаметру осуществляли на 152 модельных деревьях всех 37 климатипов. На каждый климатип анализировали не менее 3 деревьев средних ступеней толщины. Керны древесины взяты на уровне минерального горизонта почвы. В настоящей статье использованы осредненные данные ширины годовых колец d_t за период 1979-2005 гг. (возраст культур 4-30 лет), а также данные по длине осевых побегов h_t за такой же период. Кроме годовых приростов по высоте и диаметру, учитывали диаметр ствола на "пне" D и на высоте 1,3 м Dbh , а также общую длину ствола H . Для каждого климатипа все промеры вначале были усреднены, а затем скорректированы на густоту насаждений с помощью линейной регрессии. Поэтому в дальнейшем изложении под высотой и диаметром климатипа понимается, соответственно, средняя высота и средний диаметр модельных деревьев данного климатипа, приведенные к средней густоте насаждений, составившей 1632 шт./га при размахе 370-2651 шт./га (Роговцев и др., 2008). Обозначим $D_t = \sum d_t$ и $H_t = \sum h_t$. Сумма годовых приростов за период 4-30 лет как диаметра D_{30} , так и высоты H_{30} отличается от измеренных в 2005 г. высоты и диаметра ствола за счет накопления ошибок измерения, кривизны стволов и отсутствия данных о приросте за 1-3 года. Однако соответствие оказалось удовлетворительным ($r_H=0,98$; $p<1\cdot10^{-4}$; $r_D=0,95$; $p<1\cdot10^{-4}$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку в задачи настоящего исследования входит анализ эффективности рассматриваемых методов, а не выявление конкретных климатипов, отличающихся повышенной интенсивностью роста, то названия популяций на рисунках опущены. Выявление лидирующих по росту и устойчивости происхождения было рассмотрено ранее (Роговцев и др., 2008). Также отметим, что в связи с большей наследуемостью высоты ствола преимущественное внимание в настоящей работе будет обращено именно на этот признак (Тараканов и др., 2001).

Из выборки всех климатипов для анализа общих закономерностей роста выберем крайние (с максимальными и минимальными значениями высоты и диаметра) и средние варианты. Соответственно вычислим минимальные, максимальные и средние значения показателей D_t , d_t , H_t , h_t за каждый год. Зависимость среднего, минимального и максимального диаметра D_t от возраста t аппроксимирована функцией Бейли-Клаттера $D=a*\exp(-b/t)$ (Bailey and Clutter, 1974), которая оказалась наилучшей из 10 исследованных, несмотря на то, что является двухпараметрической и теоретически должна проигрывать трехпараметрической. При вычислениях во все формулы добавлялся свободный член c , чтобы учесть отсутствие данных о приросте за 1-3 года. Отметим, что это единственная функция, у которой в показателе степени имеется член $-b/t$. Почти у всех остальных на этом месте стоит $-bt$, в тех или иных вариациях (Zhao et al.,

2006). Зависимость средней, минимальной и максимальной высоты ствола H_t от возраста оказалась практически линейной (рис. 1). Это означает, что 30-ти лет явно недостаточно для замедления роста и оценить предельную высоту по этим данным невозможно.

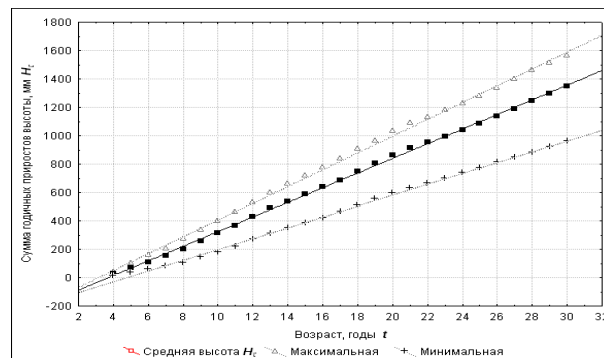


Рисунок 1 - Зависимость средней, минимальной и максимальной сумм годовых приростов высоты ствола от возраста насаждений

Зависимость среднего, минимального и максимального диаметра ствола D_t от возраста насаждений показала явную тенденцию к замедлению (рис. 2). Поэтому для каждого климатипа была вычислена аппроксимация функцией Бейли-Клаттера. Показатель a – расчетный предельный диаметр ствола. Показатель b отражает пологость кривой роста дерева, чем он выше, тем кривая положе.

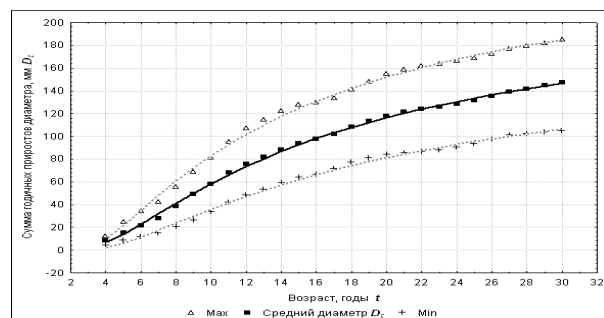


Рисунок 2 - Зависимость средней, минимальной и максимальной сумм годовых приростов диаметра ствола от возраста насаждений. Аппроксимация – функция Бейли-Клаттера $D=a*\exp(-b/T)-c$

Далее были вычислены ранги высот климатипов H и H_{30} , диаметров D , Dbh , D_{30} и предельного диаметра a , а также ранги годовых приростов по высоте и диаметру и их сумм за каждый год. Замена исходных значений на ранги нивелирует общую реакцию климатипов на внешние условия и позволяет в большей степени сравнивать их по внутренне обусловленным характеристикам. Однако необходимо определиться с тем, какие именно признаки целесообразно взять в качестве «результатирующих», поскольку для высоты климатипа в возрасте 30 лет имеются два показателя (H , H_{30}), а для диаметра – четыре (Dbh , D , D_{30} , a), каждый из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Поэтому наборы высот и диаметров были обработаны по отдельности методом главных компонент и ранжированные первые компоненты обоих наборов – H_1 и

D_1 – взяты как «интегрирующие» признаки для высоты и диаметра, соответственно.

В термин «интегрирующий» вкладывается тот смысл, что данные признаки на максимально возможном уровне коррелированы с различными исходными признаками, что уменьшает вероятность ошибки прогноза, которая имеет место при использовании только одного из показателей высоты или диаметра.

Таблица 2 - Корреляции «интегрирующих» признаков H_1 и D_1 с показателями высоты и диаметра ствола климатипов в возрасте 30 лет (выделены коэффициенты с $r < 0,05$)

Показатель	H_1	D_1
Высота ствола, H	0,98	0,27
Высота ствола, $H_{30} = \Sigma h_t$	0,99	0,29
Диаметр ствола на 1,3 м, Dbh	0,35	0,92
Диаметр ствола на "пне", D	0,37	0,94
Диаметр ствола, $D_{30} = \Sigma d_t$	0,27	0,97
Предельный диаметр ствола, a	0,15	0,90
Пологость кривой роста, b	-0,07	0,00
H_1	1,00	0,29
D_1	0,29	1,00

Корреляция параметра b с показателями H_1 и D_1 также отсутствует. Это может означать, что большой прирост по высоте или диаметру на начальных этапах онтогенеза (что приведет к выпуклости кривой хода роста) мало что говорит о действительном потенциале роста дерева. Для оценки зависимости «интегрирующих» оценок от значений признаков на ранних этапах онтогенеза последовательным суммированием годовых приростов были построены кривые хода роста по высоте и диаметру за весь исследуемый период роста насаждений (30 лет).

Более-менее прогностических значений ($r_s \sim 0,8$) сумма приростов по высоте достигает к 10-12-летнему возрасту, а по диаметру – к 15-17-летнему (рис. 3), т.е. в начальный период кульминации роста культур в условиях Среднеобского бора. Однако на начальных этапах роста имеются корреляции с приростами как высоты (что неудивительно), так и диаметра. При этом связь между «интегрирующей» высотой и шириной годовых колец, не показанная на рис.3, обнаруживается только для возраста культур 4 и 5 лет и составляет около 0,5...0,6. Из этого следует, что отбор по высоте, видимо, можно начинать раньше, чем по диаметру, например, с 10-13-летнего возраста, и вести его, также учитывая приросты не только высоты, но и диаметра. Критерии учета годовых приростов h_t и d_t могут быть уточнены после изучения динамики метеофакторов и их связи с приростами. Возможно, что определенные сочетания метеофакторов в ранние периоды онтогенеза играют очень важную роль в дальнейшем росте деревьев, закладывая своеобразный «фундамент» для интенсивного роста на последующие периоды. С другой стороны, диагностирующее значение может иметь и стадия онтогенеза как таковая. Как мы отметили, достоверная связь между H_1 и d_t обнаруживается только в возрасте 4-5 лет, а связь между H_1 и h_t наибольших значений порядка 0,75 достигает в возрасте 12-13 и 26-27 лет (см. рис. 3). На динамику коэффициентов наследуемости го-

Корреляции H_1 и D_1 с исходными для их расчета признаками действительно довольно высоки (табл. 2).

Связь H_1 с H и H_{30} составляет $\geq 0,98$. Показатель D_1 тоже достаточно хорошо представляет все четыре исходных признака, (Dbh , D , D_{30} , a), корреляции равны или превышают 0,90. Связь между H_1 и D_1 недостоверна. Это означает, что отбор на высоту и диаметр в принципе можно проводить независимо.

личных приростов по высоте и возможность применения этого феномена в селекции обращали внимание и другие исследователи (Исаков, 1999). Но возможность уточнения диагностики интенсивности роста по основному селектируемому признаку – высоте ствола – с помощью учета годовых приростов по диаметру на определенном отрезке онтогенеза, насколько нам известно, ранее не обсуждалась. Этот аспект заслуживает дальнейшего изучения.

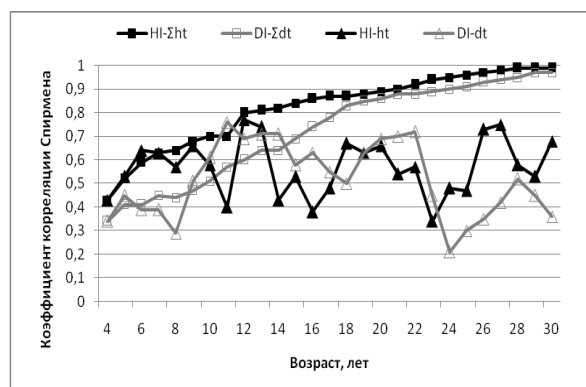


Рисунок 3 - Корреляции «интегрирующих» признаков H_1 и D_1 с рангами годовых приростов и их сумм

Изучение корреляций интегрирующих показателей с годовыми приростами и их суммами дает лишь общее представление о возможностях ранней диагностики. Поэтому будем решать следующую задачу. Выделим по высоте дерева H в 30 лет лучшие 7 климатипов (что составляет примерно 20 % анализируемой выборки) и попытаемся определить, можно ли их было распознать по приростам высоты и диаметра за первые 10 лет роста. На основе изучения модельных деревьев к «лидирующим» по высоте ствола климатипам относятся в порядке убывания признака: популяция № 57 из Пензенской обл., № 54 из Тамбовской обл., № 85 из Новосибирской обл., № 62 из Волгоградской обл., № 65 из Татарстана, № 86 из Новосибирской обл.,

№ 76 из Свердловской обл.

Учитывая дополнительную диагностирующую роль годовичных приростов в определенные отрезки онтогенеза, обрабатываем ранги приростов и их сумм методом главных компонент и вычислим регрессию H на первые 4 компоненты (84,4 % общей изменчивости).

Если мы хотели бы гарантированно сохранить все 7 лучших в будущем популяций, то в возрасте 10 лет нам пришлось бы сохранять около 15 климатипов, а при оптимальном отборе граница проходит по значению «8» на оси абсцисс, при этом мы сохраним 6 из 7 лучших популяций (рис. 4).

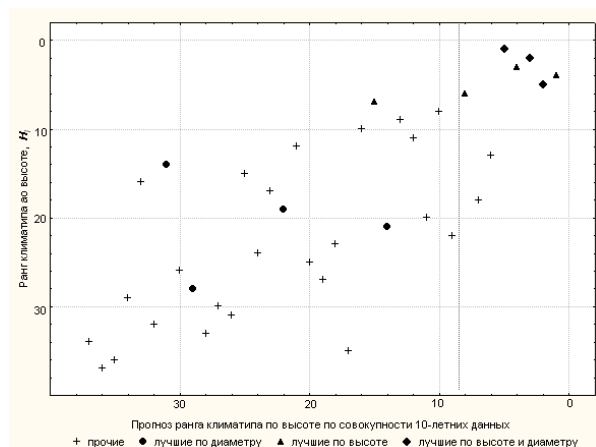


Рисунок 4 - Результаты прогноза ранга высоты дерева в 30 лет по рангам приростов высоты и диаметра и их сумм в возрасте до 10 лет включительно. Нанесена линия оптимального отбора

Заметим, что при границе «5» мы бы отобрали только лучшие климатипы. Результат был бы хуже, если вместо прогнозируемого ранга по всем приростам и их суммам использовать только ранг высоты дерева в 10 лет (рис. 5) с порогом в 10 деревьев. При этом потеряли бы один «лидирующий» климатип.

В отличие от высоты климатипа, начинать отбор будущих рекордсменов по диаметру ствола в возрасте 10 лет – занятие довольно бесперспективное. Ситуация несколько улучшается, если начинать отбор в 15-летнем возрасте (рис. 6). Порог в 7-8 оставляемых приводит к потере двух будущих лучших вариантов.

Правда, для того, чтобы сохранить и их, порог отбора надо устанавливать в 23 климатипа из 37, что составляет больше 60 % и явно неприемлемо. Обращает на себя внимание и то, что среди них нет ни одного будущего лидера по высоте. Отбор таких деревьев не имеет смысла.

Ситуация несколько улучшается, если применить методы многомерного анализа. Аналогично предыдущему случаю, обрабатываем приросты и их суммы за 15 лет методом главных компонент и вычислим регрессию A на первые 4 компоненты (79,9 % общей изменчивости).

Если мы хотели бы гарантированно сохранить все 7 лидеров, то в возрасте 15 лет нам пришлось бы сохранять всего 11 климатипов (рис. 7). Таким образом, в этом случае использование методов

многомерного анализа позволяет применить более осмысленную селекционную стратегию. Но в целом эффективность отбора по диаметру ствола явно ниже, чем по высоте.

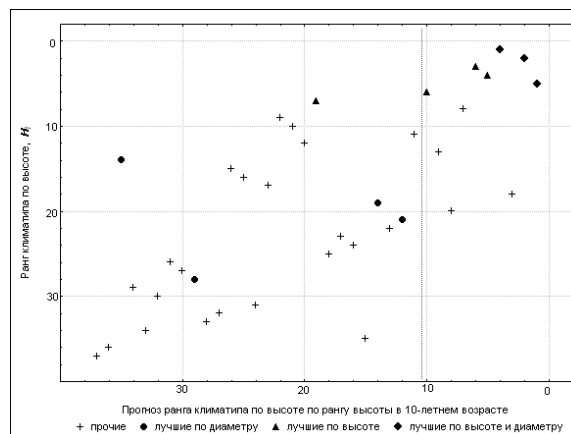


Рисунок 5 - Результаты прогноза ранга высоты дерева H_1 по рангу высоты в возрасте 10 лет. Нанесена линия оптимального отбора

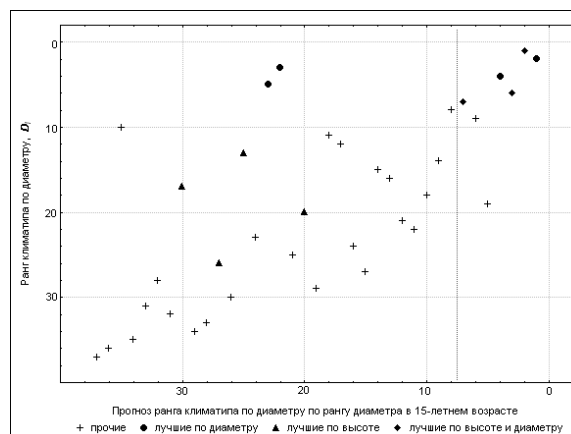


Рисунок 6 - Результаты прогноза ранга диаметра D_1 по рангу диаметра в возрасте 15 лет

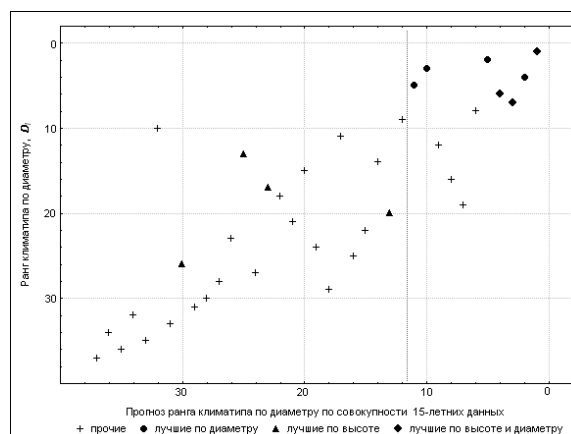


Рисунок 7 - Результаты прогноза ранга предельного диаметра ствола D_1 по рангам приростов высоты и диаметра и их сумм в возрасте до 15 лет включительно. Нанесена линия оптимального отбора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты оценки эффективности «ранней диагностики» быстроты роста потомств различных климатипов в географических культурах Новоси-

бирской области свидетельствуют о перспективности применения методов многомерной статистики для решения такого рода задач. Это обусловлено большими прогностическими возможностями комплекса признаков (различные оценки высоты и диаметра ствола, годовые приросты по высоте и диаметру) по сравнению с одним признаком (напр., высотой ствола) для ранней диагностики быстрорастущих климатипов.

Один из интересных результатов проведенных исследований состоит в том, что на определенных этапах онтогенеза годовые приросты как по высоте, так и по диаметру могут достоверно коррелировать, например, с высотой климатипов в 30 лет. Включение этих «маркерных» приростов в селекционный индекс может существенно повысить вероятность прогноза лучших популяций. Для выявления причин этих связей необходимы специальные исследования.

Подтверждено, что отбор лучших вариантов по высоте ствола более эффективен и может осуществляться в более раннем возрасте, чем по диаметру.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Веняляйнен, М. Долгосрочная программа селекции сосны обыкновенной в Финляндии / М. Веняляйнен // Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений. (Доп. вып.). – М., 1990. – С. 16-19.
- Ворончихин, Л.И. Селекция и семеноводство хвойных в Кировской области и Удмуртской АССР / Л.И. Ворончихин, А.И. Видякин, С.М. Овечкин // Генетика и селекция в лесоводстве: Сб. научн. тр. – Воронеж: ЦНИИЛГиС, – М., 1991. – С. 219-224.
- Долголиков, В.И. О ранней диагностике быстроты роста в высоту у сосны и ели по прямому признаку / В.И. Долголиков // Состояние и перспективы развития лесной генетики, селекции, семеноводства и интродукции. Методы селекции древесных пород. – Рига, 1974. – С. 45-48.
- Ефимов, Ю.П. Проблемы повышения эффективности лесосеменных плантаций / Ю.П. Ефимов // Генетика и селекция в лесоводстве. – Воронеж: ЦНИИЛГиС. – М., 1991. – С. 198-213.
- Исаков, Ю.Н. Эколого-генетическая изменчивость и селекция сосны обыкновенной: автореф. дис. ... докт. биол. наук. 03.00.15; 06.01.05. / Ю.Н. Исаков – Ст.-Петербург, 1999. – 36 с.
- Маслаков, Е.Л. Формирование сосновых молодняков / Е.Л. Маслаков – М.: Лесная пром-ть, 1984. – 168 с.
- Молотков, П.И. Стратегия селекции и семеноводства сосны обыкновенной / П.И. Молотков, И.Н. Патлай // Лесная генетика, селекция и физиология древесных растений. (Доп. вып.). – М., 1990. – С. 9-16.
- Роговцев, Р.В., Тараканов В.В., Ильичев Ю.Н. Продуктивность географических культур сосны в условиях среднеобского бора / Р.В. Роговцев, В.В. Тараканов, Ю.Н. Ильичев // Лесное хоз-во. – 2008. – № 2. – С. 36-38
- Рогозин, М.В. Ранняя диагностика быстроты роста сосны обыкновенной в культурах / М.В. Рогозин // Лесоведение. – 1983. – № 2. – С. 66-72.
- Тараканов, В.В. Селекционное семеноводство сосны обыкновенной в Сибири / В.В. Тараканов [и др.] – Новосибирск: Наука, 2001. – 230 с.
- Указания по лесному семеноводству в Российской Федерации. – М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. – 198 с.
- Bailey, R.L. Base-age invariant polymorphic site curves. / R.L. Bailey, J.L. Clutter // For. Sci. – 1974. – 20 (2). – P.155–159.
- Zhao, W. Modelling height-diameter relationships of *Pinus radiata* plantations in Canterbury, New Zealand / W. Zhao, E.G. Mason, J. Brown // New Zealand Journal of Forestry. – 2006. – 51(1). – P. 23-27.

Поступила в редакцию 13 октября 2009 г.
Принята к печати 25 февраля 2010 г.