

УДК 004.942

ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ БИОСТИМУЛЯТОРОВ РОСТА НА УКОРЕНЯЕМОСТЬ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЕКОРАТИВНЫХ ХВОЙНЫХ ПОРОД

Махинкина Р.Р.

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина», Орел, Россия (302019, г. Орел, Генерала Родина ул., 69), e-mail: vasilkina.2013@mail.ru

В статье выполнено математико-статистическое моделирование влияния новых экологически чистых биостимуляторов роста на укореняемость зеленых черенков декоративных хвойных пород. Показана эффективность использования в этих целях относительно нового метода дисперсионного анализа – обобщенной линейной модели *GLM (General Linear Model)*, в основе которой лежит регрессионный анализ. В представленном исследовании для реализации процедуры *GLM* использовался базовый пакет программ статистического анализа *SPSS Base* одной из ранних версий. При помощи «ящичковых» диаграмм, или диаграмм Тьюки проводится визуальная оценка, а проведение процедуры «Обобщенная линейная модель» дает количественную характеристику результатов исследования. Представленные в статье разработки показывают эффективность применения обобщенной линейной модели, как инструмента для анализа результатов многих сельскохозяйственных исследований

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Биостимуляторы роста, гетероауксин, циркон, Рибав-экстра, укореняемость черенков, обобщенная линейная модель, уровень статистической значимости разностей средних, критерий Тьюки, однородные подгруппы.

APPLICATION OF GENERAL LINEAR MODELS FOR INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GROWTH BIOSTIMULATORS ON THE DERIVATIVITY OF THE PLANTING MATERIAL OF DECORATIVE CONVENIENT ROCKS

Makhinkina R.R.

FGBOU HPE "Orel State Agrarian University. N.V. Parahina ", Orel, Russia (302019, Orel, General Rodina st., 69), e-mail: vasilkina.2013@mail.ru

The article is devoted to the mathematical and statistical modeling of the effect of new ecologically clean growth biostimulators on the rooting of green cuttings of ornamental softwoods. The effectiveness of using for this purpose a relatively new method of variance analysis - the generalized linear model *GLM (General Linear Model)*, which is based on regression analysis. In the presented study, the base package of programs for statistical analysis of *SPSS Base*, one of the earlier versions, was used to implement the *GLM* procedure. With the help of "box" diagrams, or Tukey diagrams, a visual assessment is performed, and the procedure "Generalized linear model" gives a quantitative description of the results of the study. Presented in the article, the development shows the effectiveness of the application of the generalized linear model as a tool for analyzing the results of many agricultural studies

KEY WORDS: Growth biostimulators, heteroauxin, zircon, Ribav-extra, rooting of cuttings, generalized linear model, level of statistical significance of mean differences, Tukey criterion, homogeneous subgroups.

Вегетативное размножение древесных растений зелеными черенками является наиболее перспективным при решении вопросов озеленения городов, защитного лесоразведения и лесовосстановления. Особую ценность имеют новые сорта хвойных пород, которые имеют особый характер роста, измененную форму кроны и особый окрас. В частности, к ним относятся можжевельник казацкий, туя западная, туя западная золотистая и

туя западная пирамидальная, являющиеся объектами данного исследования. Можжевельник казацкий (*Juniperussabina*) – стелющийся кустарник высотой до 1,5 м, быстро разрастающийся в ширину и образующий плотные заросли. Туя западная – (*Thujaoccidentális*) – вечнозелёное хвойное дерево из семейства Кипарисовых (лат. *Cupressaceae*), туя западная золотистая – крупный, плотный, кустарник или небольшое хвойное деревце, туя западная пирамидальная имеет крону в форме пирамиды.

Целью исследования являлось сравнение экологически безопасных стимуляторов роста перечисленных декоративных хвойных пород, повышающих укореняемость зеленых черенков, с помощью нового метода дисперсионного анализа – обобщенной линейной модели.

Материалы и методика исследований

Опыт проводился в питомнике МУП Совхоз «Коммунальник» г. Орла в условиях защищенного и открытого грунта. Для заготовки зеленых черенков использовали маточники, технология выращивания и уход за маточниками – общепринятые, схема посадки – 0,5×3 м. В маточных насаждениях отбирали растения умеренной силы роста, без признаков повреждения болезнями, вредителями, низкими температурами. Высаживали по 100 зеленых черенков с пяточкой на вариант в трехкратной повторности. Укоренение черенков проводили в пленочных парниках с системой автоматизированного туманообразования. Укорененные черенки по трем вариантам высаживали в открытый грунт на доращивание. В контрольном варианте черенки замачивали в растворе гетероауксина. Во 2-м варианте для повышения эффективности действия гетероауксина совмещали обработку черенков гетероауксином (200 мг/л воды) и цирконом (1 мл/10 л воды). В 3-м варианте использовали препарат Рибав-экстра (1 мл/10 л воды), являющийся природным регулятором роста и развития корневой системы.

Особенность использованной нами методики сравнения эффективности перечисленных стимуляторов роста заключалась в использовании в этих целях одного из относительно новых методов дисперсионного анализа – обобщенной линейной модели *GLM* (*General Linear Model*) [1]. В отличие от традиционного «классического» метода по Фишеру, согласно которому в однофакторном случае дисперсионного анализа совокупная дисперсия всех наблюдаемых значений раскладывается на дисперсию внутри отдельных групп и дисперсию между группами (см., например, [1]), в *GLM* используется так называемая, «*non full rank linear model*» (линейная модель неполного ранга), в основе которой лежит регрессионный анализ. Кроме этого, в *GLM* предлагаются еще и дополнительные расширения, самым важным из которых является тест для сравнения средних значений отдельных слоев (подпопуляций), который выполняется после проведения дисперсионного анализа.

В нашем исследовании для реализации процедуры *GLM* использовался базовый пакет программ статистического анализа *SPSS Base* одной из ранних версий [7], которая, тем не менее, характеризуется широким набором графических и аналитических процедур.

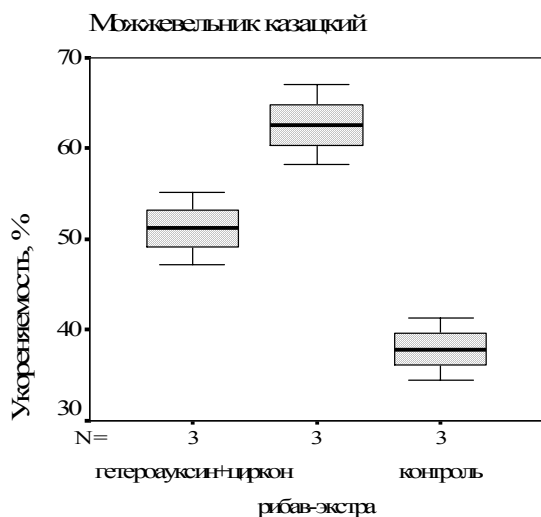
Результаты и их обсуждение

Полученные результаты по укореняемости зеленых черенков исследуемых хвойных пород приведены в таблице 1 в формате $M \pm m$ (среднее \pm стандартное отклонение).

Таблица 1 – Укореняемость зеленых черенков хвойных пород, %

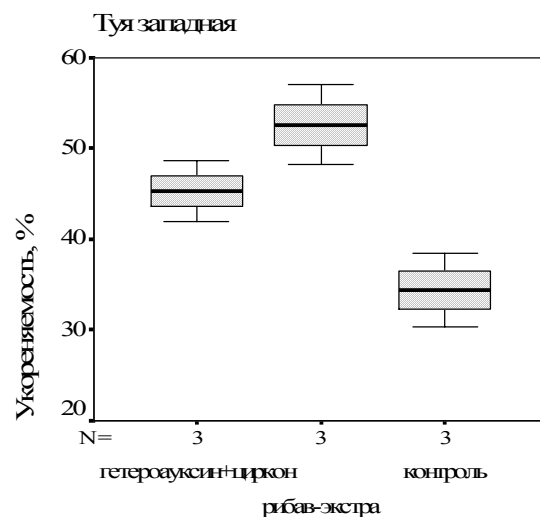
Порода	Гетероауксин + циркон	Рибав-экстра	Гетероауксин (контроль)
Можжевельник казацкий	51,2 \pm 4,0	62,6 \pm 4,4	37,9 \pm 3,4
Туя западная	45,3 \pm 3,4	52,6 \pm 4,4	34,4 \pm 4,1
Туя западная золотистая	52,1 \pm 3,6	68,0 \pm 3,4	49,2 \pm 3,2
Туя западная пирамидальная	35,5 \pm 3,2	48,3 \pm 4,4	19,8 \pm 2,6

Традиционно в сельскохозяйственных исследованиях при сравнении средних применяется *t*-тест (критерий Стьюдента), предполагающий оценку статистической значимости разности средних опытных вариантов по отношению к контролю. Во многих учебниках прежних лет даются рекомендации по расчету критерия наименьшей существенной разности (НСР, в англоязычных источниках *LSD – Least Significant Difference*), основанного на понятии *t*-критерия (см., например, [2, 3]). Этот же критерий НСР рекомендуется для анализа результатов сортоиспытаний [4]. Но еще в те годы видный отечественный селекционер, генетик и биометрик Н.А. Плохинский отмечал, что совершенно недопустимо задачу сравнения нескольких средних решать методами, применимыми только для сравнения двух средних [5]. В работе [6] показано, что подобный способ сравнения может привести к ошибочному выводу: сравнивая в один прием лишь две средние, мы не учитываем информацию об остальных средних, и то, что невозможно на двух случайных выборках, может стать вполне возможным на большем их числе (чем больше проводится испытаний, тем более редкие события могут произойти). Кроме того, незначимые различия, накапливаясь от пары к паре, могут стать вполне значимыми, хотя мы этого не замечаем. Начальный этап сравнения средних – визуальный анализ диаграмм, иллюстрирующих различие медиан показателя и интервалов его варьирования для каждого варианта опытов – рисунок 1.



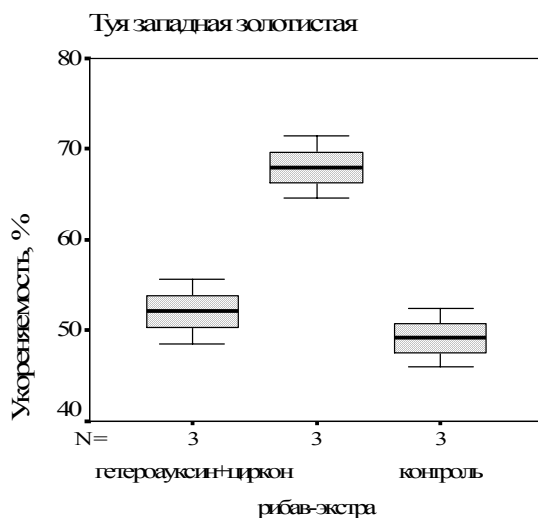
a

Препарат



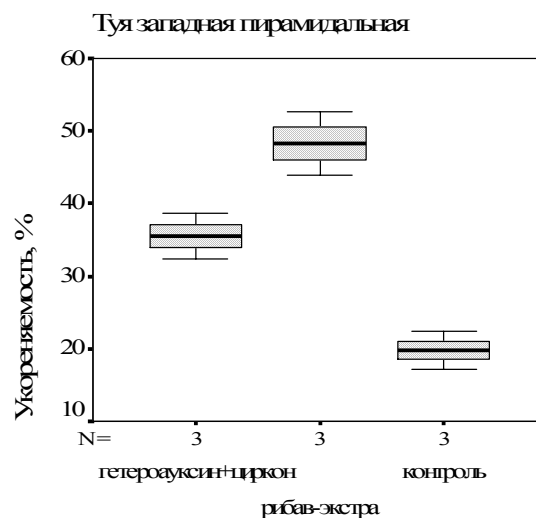
б

Препарат



в

Препарат



г

Препарат

Рисунок 1 – Влияние стимуляторов роста на укореняемость: *a* – можжевельник казацкий; *б* – туя западная; *в* – туя западная золотистая; *г* – туя западная пирамидальная

Поясним эти диаграммы, называемые ящичковыми, диаграммами с усами, или диаграммами Тьюки [1]. Жирные горизонтальные линии внутри «ящичков» отвечают медианам, «ящички» включают в себя 50% измерений, «усы» (в данном конкретном случае) отвечают максимальным и минимальным значениям показателя. При трехкратной повторности медианы совпадают со средними значениями и размещены посередине «ящичков». Для можжевельника казацкого и туи западной пирамидальной (рисунок 1 *a* и *г*)

распределения значений укореняемости по вариантам опытов не перекрываются (полностью разделены), что свидетельствует в пользу статистической значимости разностей соответствующих средних. Для туи западной золотистой (рисунок 1 в) распределения значений укореняемости по вариантам опытов «гетероауксин + циркон» и «контроль» перекрываются, и следует ожидать статистической незначимости разности соответствующих средних.

Количественную оценку степени статистической значимости разностей средних дают результаты реализации процедуры «Обобщенная линейная модель» - вначале проводится оценка статистической значимости различия средних «в целом». При этом на дисплей выводится тест межсубъектных эффектов «*Tests of Between-Subjects Effects*». В качестве примера ниже приведена таблица 2 для можжевельника казацкого.

Таблица 2 – Тест межсубъектных эффектов модели показателя «Укореняемость можжевельника казацкого»

Источник изменчивости	Сумма квадратов	Ст. св.	Средний квадрат	F	Значимость	
Исправленная модель	916,940	2	458,470	29,314	0,001	
Постоянная	23012,890	1	23012,890	1471,412	0,000	
ПРЕПАРАТ	916,940	2	458,470	29,314	0,001	
Ошибка	93,840	6	15,640			
Сумма	24023,670	9				
Исправленная сумма	1010,780	8				

Из таблицы 2 следует, что в случае можжевельника казацкого наблюдается очень высокая статистическая значимость фактора «Препарат» (стимулятор роста) по показателю «Укореняемость» – критерий Фишера $F=29,314$ статистически значим на p -уровне 0,001. Тест межсубъектных эффектов дает также информацию о качестве линейной модели: в данном случае коэффициент детерминации $R^2=0,907$.

Результаты множественного сравнения средних в определенной мере зависят от выбора критерия. В нашем исследовании принят достаточно чувствительный критерий Тьюки, который позволяет не только проверить статистическую значимость разностей между средними, но и решить задачу выделения однородных подмножеств средних, не отличающихся значимо друг от друга. При выборе данного критерия сравнения межсубъектных эффектов на дисплей выводятся две таблицы: таблица 3 однородных

подгрупп стимуляторов роста и таблица 4 множественных сравнений разностей показателя «Укореняемость».

Таблица 3 – Однородные подгруппы стимуляторов роста черенков можжевельника казацкого по критерию Тьюки (уровень значимости критерия различия между подгруппами $p=0,05$)

Препарат	Повторность	Укореняемость, %		
		1	2	3
Контроль	3	37,900		
Гетероауксин + циркон	3		51,200	
Рибав-экстра	3			62,600
Уровень значимости критерия различия в подгруппе		1,000	1,000	1,000

Из таблицы 3 следует, что средние показателя «Укореняемость можжевельника казацкого» по всем трем вариантам опытов составляют самостоятельные однородные подгруппы стимуляторов роста и все разности между средними статистически значимы.

Эту информацию дополняют данные таблицы 4, согласно которым 95%-ные доверительные интервалы, соответствующие всем средним разностям, не включают в себя нуль (см. графы 6 и 7 таблицы 4).

Таблица 4 – Апостериорные парные сравнения средних показателя «Укореняемость можжевельника казацкого» по критерию Тьюки

(I) Препарат	(J) Препарат	Средняя разность (I-J)	Стд. ошибка	Знч. (2-сторон)	95% доверительный интервал	
					нижняя граница	верхняя граница
1	2	3	4	5	6	7
Гетероауксин + циркон	Рибав-экстра	-11,4	3,229	0,029	-21,308	-1,492
	Контроль	13,3	3,229	0,015	3,392	23,208
Рибав-экстра	Гетероауксин + циркон	11,4	3,229	0,029	1,492	21,308
	Контроль	24,7	3,229	0,001	14,792	34,608
Контроль	Гетероауксин + циркон	-13,3	3,229	0,015	-23,208	-3,392
	Рибав-экстра	-24,7	3,229	0,001	-34,608	-14,792

Полезным результатом процедуры «Обобщенная линейная модель» является таблица 5, содержащая МНК-оценки параметров модели (МНК – метод наименьших квадратов).

Таблица 5 – МНК-оценки параметров линейной модели показателя «Укореняемость можжевельника казацкого»

Параметр	<i>B</i>	Стд. ошибка	<i>t</i>	Значимость	95% доверительный интервал
----------	----------	-------------	----------	------------	----------------------------

					нижняя граница	нижняя граница
Постоянная	37,9	2,283	16,599	0,000	32,313	43,487
[ПРЕПАРАТ=1]	13,3	3,229	4,119	0,006	5,399	21,201
[ПРЕПАРАТ=2]	24,7	3,229	7,649	0,000	16,799	32,601
[ПРЕПАРАТ=3]	0	,	,	,	,	,

Поясним таблицу 5. В математической форме однофакторная линейная модель выглядит следующим образом:

$$Y_{ij} = \mu_0 + \alpha_i + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где Y_i – наблюдаемое значение выходной переменной Y на i -м уровне фактора; μ_0 – оценка свободного коэффициента модели; α_i – оценки главных эффектов на i -м уровне; ε_i – случайная ошибка. В таблице 5 постоянная $\mu_0=37,9\%$, эффект препарата 3 принят за нулевой, и средняя укореняемость можжевельника казацкого в контрольном опыте 37,9%. Эффекты повышения укореняемости можжевельника казацкого) опытных препаратов отсчитываются уже от этого уровня; так, укореняемость в варианте 2 (стимулятор роста Рибав-экстра) характеризуется добавкой $\alpha_2=24,7\%$, с доверительным 95%-ым интервалом 16,8% ... 32,6%, что отвечает значениям укореняемости 54,7% ... 70,5%. Опытный препарат 1 (стимулятор роста гетероауксин + циркон) характеризуется меньшим эффектом $\alpha_1=13,3\%$ с доверительным 95%-ым интервалом 5,4% ... 21,2%, что отвечает значениям укореняемости 43,3% ... 59,1%.

Таким образом, по результатам эксперимента можно утверждать, что оба новых стимулятора эффективнее контроля, но применение стимулятора роста Рибав-экстра предпочтительнее.

Несколько иные результаты получены для туи западной золотистой. И в этом случае наблюдается статистическая значимость различия средних «в целом», однако однородных подгрупп стимуляторов роста уже не три, а только две – таблица 6. Из таблицы следует, что средние значения показателя «Укореняемость туи западной золотистой по двум вариантам опытов – варианту 2 и контролю – входят в одну однородную подгруппу, вариант 3 – в другую самостоятельную подгруппу с более высоким значением средней величины укореняемости черенков – 68,0%. Это интерпретируется как наличие статистической значимости разности между укореняемостью при обработке черенков биостимулятором Рибав-экстра по сравнению с контролем и обработкой биостимулятором гетероауксин + циркон.

Таблица 6 – Однородные подгруппы стимуляторов роста черенков туи западной золотистой по критерию Тьюки (уровень значимости критерия различия между подгруппами $p=0,05$)

Препарат	Повторность	Укореняемость, %
----------	-------------	------------------

		1	2
Контроль	3	49,2	
Гетероауксин + циркон	3	52,1	
Рибав-экстра	3		68,0
Уровень значимости критерия различия в подгруппе		0,579	1,000

Как и в случае можжевельника казацкого, эти результаты дополняют апостериорные парные сравнения средних показателя «Укореняемость туи западной золотистой» по критерию Тьюки (таблица не приводится ради сокращения объема публикации), согласно которым 95%-ные доверительные интервалы, соответствующие средним разностям по опытному варианту с препаратом «Рибав-экстра» и двум другим вариантам, не включают в себя нуль, тогда как 95%-ный доверительный интервал, соответствующий средней разности по опытному варианту с препаратом «Гетероауксин + циркон» и контролю, включает в себя нуль и, следовательно, это разность является статистически незначимой.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю В.Г. Шуметову, профессору Орловского государственного университета им. Н.В. Парихина, за предоставление возможности анализа данных в системе *SPSS Base 8.0* и оказанную помощь при разработке данной публикации.

Выводы

Приведенные результаты демонстрируют эффективность применения относительно нового метода дисперсионного анализа – обобщенной линейной модели – в качестве инструмента анализа влияния новых биостимуляторов роста на укореняемость зеленых черенков декоративных хвойных пород. Алгоритмы метода, реализованные в широко распространенной среди отечественных исследователей системе анализа данных *SPSS*, позволяют выполнить корректное сравнение средних значений информативных показателей в случае, когда вариантов опытов более двух, оценить их эффективность по сравнению с контролем, выделить однородные варианты опытов.

Список литературы

1. Бююль А., Цёфель П. *SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей.* – СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. – 608 с.
2. Доспехов Б.А. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований).* – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

3. Лакин Г.Ф. Биометрия. Учебное пособие для биол. спец. вузов, 4-е изд., перераб. и доп. –М.: Высшая школа, 1990. – 352 с.
4. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур / Под ред. М.А. Федина. – М.: Калининская областная типография управления изд-в полиграфии и книжной торговли Калининского облисполкома, 1985. – Вып. 1. – 269 с.
5. Плохинский Н.А. Алгоритмы биометрии / Под ред. Б.В. Гнеденко. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 150 с.
6. Шуметов В.Г., Коломейченко А.С., Буяров В.С., Метасова С.Ю. Множественное сравнение средних в эмпирических сельскохозяйственных исследованиях // Вестник Орел ГАУ. – 2017. – №4(67). – С.113-122.
7. SPSS Base 8.0 для Windows. Руководство по применению. Перевод–Copyright 1998 СПСС Русь. – 397 с.