

## Использование метода путевых коэффициентов S. Wright для статистического анализа системы взаимосвязанных признаков риса

Д.П. Паламарчук<sup>1</sup>, М.Р. Козаченко<sup>2</sup>, С.И. Святченко<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Институт риса Национальной академии аграрных наук Украины, с. Антоновка, Скадовский район, Херсонская область, Украина

<sup>2</sup> Институт растениеводства им. В.Я. Юрьева Национальной академии аграрных наук Украины, Харьков, Украина

 e-mail: yurievregion@gmail.com

В настоящее время актуален путевой анализ S. Wright продуктивности растений. Целью исследований было определить парные коэффициенты корреляций и путевые коэффициенты S. Wright признаков сортов риса и на их основе выявить вклад каждого из них в продуктивность растения. Исходным материалом были 10 сортов риса. Опыты проведены в 2013, 2014 и 2016 гг. в условиях орошения на опытном поле Института риса Национальной академии аграрных наук Украины. Посев осуществляли сеялкой СКС-6А с нормой высева 7.0 млн всхожих семян на 1 га. Предшественник – люцерна. Площадь делянки – 5 м<sup>2</sup>, междурядья – 15 см. Анализировали растения по признакам: продуктивность (масса зерна) растения, масса всей метелки, масса зерна с боковых стеблей, продуктивная кустистость, количество зерен в метелке, количество колосков в метелке, масса 1000 зерен, масса зерна с метелки, высота растения, длина и плотность метелки, количество пустых колосков в метелке, пустозерность. Парные коэффициенты корреляций определяли по методике Б.А. Доспехова, путевой анализ – по методике S. Wright по работе А.И. Седловского, С.П. Мартынова и Л.К. Мамонова (1982). Определена корреляция продуктивности с 12 количественными признаками риса: тесная – с массой зерна с боковых стеблей; средняя – с массой всей метелки и с массой зерна с метелки. Согласно путевому анализу продуктивности растений, корреляция признаков растений с продуктивностью зависит как от прямых, так и от косвенных эффектов влияния каждого признака на продуктивность. Установлен относительный вклад влияния каждого из 12 исследуемых признаков на продуктивность риса, как прямой (непосредственный), так и косвенный (побочный) эффекты их при взаимодействии с другими признаками. Это дало возможность раскрыть причины и следствия взаимозависимостей между признаками и выделить селекционно-ценные для отбора признаки, такие как масса всей метелки и продуктивная кустистость, которые имели наибольший прямой эффект влияния на продуктивность и достоверную корреляцию с ней.

Ключевые слова: рис; сорт; признак; продуктивность растения; корреляция; путевой анализ; вклад количественного признака в продуктивность; селекционное значение признака.

**Для цитирования:** Паламарчук Д.П., Козаченко М.Р., Святченко С.И. Использование метода путевых коэффициентов S. Wright для статистического анализа системы взаимосвязанных признаков риса. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019;23(4):430-438. DOI 10.18699/VJ19.511

## Use of S. Wright's path coefficient method for statistical analysis of interrelated traits in rice

D.P. Palamarchuk<sup>1</sup>, M.R. Kozachenko<sup>2</sup>, S.I. Sviatchenko<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Institute of Rice, NAAS of Ukraine, Antonovka, Skadovskiy district, Kherson region, Ukraine

<sup>2</sup> Plant Production Institute nd. a. V.Ya. Yuriev, NAAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine

 e-mail: yurievregion@gmail.com

S. Wright's analysis of plant productivity is of great current interest. The research objective was to determine the pair correlation coefficients and S. Wright's path coefficients for rice varieties and, on their basis, to identify the contribution of each of them to the plant productivity. Ten rice varieties were taken as the test material. The experiments were conducted in the irrigated experimental field of the Institute of Rice of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine in 2013, 2014 and 2016. Seeds were sown with an SKS-6A manual seeder; the seeding rate was 7.0 mln germinable seeds per hectare. The predecessor was alfalfa. The plot area was 5 m<sup>2</sup>; the sowing distance was 15 cm. The plants were analyzed for the following traits: plant productivity (grain weight), panicle weight, grain weight from side stems, productive tillering capacity, grain number per panicle, spikelet number per panicle, 1000-grain weight, grain weight per panicle, plant height, panicle length and density, empty spikelet number per panicle, and incidence of blind seed disease. Pair correlation coefficients were determined by B.A. Dospikhov's method; path analysis, by S. Wright's method. The correlations of productivity with 12 quantitative traits of rice were determined: the correlation was close with the grain weight from side stems and medium with the panicle weight and with the grain weight per panicle. Path analysis of the plant productivity established that the correlations of plant traits with

the productivity depended both on direct and indirect effects of each trait on the productivity. The relative contribution of each of the studied 12 traits to the rice productivity was determined; both direct and indirect effects of their interactions with other traits were evaluated. This made it possible to discover causes and consequences of interrelations between the traits and, as a result, to choose valuable-for-selection traits, such as panicle weight and productive tillering capacity, which had the greatest direct effects on the productivity and significant correlations with it. Key words: rice; variety; trait; plant productivity; correlation; path analysis; contribution of a quantitative trait to the productivity; selection value of the trait.

**For citation:** Palamarchuk D.P., Kozachenko M.R., Sviatchenko S.I. Use of S. Wright's path coefficient method for statistical analysis of interrelated traits in rice. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2019;23(4):430-438. DOI 10.18699/VJ19.511 (in Russian)

## Введение

Эффективность использования исходного материала в селекции зависит от возможности установить особенности количественных признаков растений, основным из которых является продуктивность, или масса зерна с растения. На уровень продуктивности влияют как условия внешней среды, так и генотипические особенности характера проявления отдельных признаков исследуемых объектов. В связи с этим селекционную оценку сортов целесообразно проводить не по отдельным признакам, а с учетом их взаимозависимости, определяемой методом корреляционного анализа. Это позволяет узнать, в какой степени изменяется основной признак, в частности продуктивность растения, в зависимости от значений других признаков, в результате чего возможен прогноз эффективности отбора уже по ним.

На важность установления корреляций различных признаков растений для определения эффективности отбора по отдельным из них в разных условиях, на целесообразность отбора по их комплексу, выделения отдельных признаков (характеристик) с наибольшим вкладом в изменчивость основного признака указывали многие авторы на примере таких культур, как рис (Samonte et al., 1998; Sürek, Beşer, 2003; Орлюк и др., 2008, 2011; Khan et al., 2009; Akinwale et al., 2011; Шпак, 2013; Hossain et al., 2015; Ratna et al., 2015) и ячмень (Bhutta et al., 2005; Ataеi, 2006; Ilker, 2006; Emine, Necmettin, 2012; Akdeniz et al., 2014).

При определении простой парной корреляции не всегда можно выявить влияние отдельных признаков. Существенное значение могут иметь косвенные эффекты других признаков. То есть парные коэффициенты корреляции хотя и важны для определения основных компонентов влияния на показатели основного признака, однако не дают полного представления о значении прямых и косвенных воздействий отдельных признаков.

Поэтому для определения вклада каждого из количественных признаков в основной, например продуктивность растения, непосредственно (прямые эффекты) и при взаимодействии с другими признаками (непрямые, косвенные, побочные эффекты) используют так называемый путь анализ S. Wright. Это эффективный метод статистического анализа причин и следствий в системе взаимозависимых признаков. Таким образом определяют детерминантные признаки как критерии отбора, по которым он будет эффективным, на что указано в некоторых работах по рису (Samonte et al., 1998; Ekka et al., 2011), ячменю (Sinebo, 2002) и пшенице (Finne et al., 2000).

Путь метод в селекции растений для анализа продуктивности в зависимости от других признаков растений

впервые был использован в 1959 г. D.R. Dewey и К.Н. Лу (Седловский и др., 1982). Ряд исследователей использовали анализ коэффициентов путей S. Wright и коэффициентов корреляции для объяснения взаимосвязей между количественными признаками различных растений, в частности риса (Samonte et al., 1998; Sürek, Beşer, 2003; Akhtar et al., 2011; Bagheri et al., 2011; Basavaraja et al., 2011; Bhadru et al., 2011; Ekka et al., 2011; Mugemangango Cyprien, Vinod Kumar, 2011; Haider et al., 2012; Hossain et al., 2015), ячменя (Ataеi, 2006; Мухордова, 2011) и пшеницы (Мухордова, Калашник, 2010; Мухордова, 2014).

Были установлены неодинаковые уровни прямых эффектов признаков растений на продуктивность сортов различных культур: для индекса продуктивности риса (Sürek, Beşer, 2003), количества зерен в колосе ячменя (Ataеi, 2006) и пшеницы (Shahid et al., 2002), высоты растений пшеницы (Aycicek, Yildirim, 2006). Необходимость изучения взаимосвязей структурных элементов растений методом путевого анализа отмечена также в исследованиях на бобах (Türk et al., 2008) и сое (Сичкар, 1998). Таким образом, в разных исследованиях говорится о целесообразности определения взаимосвязи между основным и другими признаками растений с использованием не только парных коэффициентов корреляции, но и путей коэффициентов для нахождения прямых и косвенных эффектов взаимосвязанных признаков.

Целью настоящей работы было установить особенности взаимосвязей между количественными признаками растений риса путем определения парных коэффициентов корреляции и путей коэффициентов, по которым выявить прямое и косвенное влияние различных признаков на продуктивность растения, на основе чего определить их селекционное значение.

## Материалы и методы

Исследования выполнены в 2013, 2014 и 2016 гг. в отделе селекции и на опытном поле Института риса Национальной академии аграрных наук Украины в различных погодных условиях. Гидротермический коэффициент Селянинова в 2013 г. составил 0,9, в 2014 г. – 0,9, в более благоприятном 2016 г. – 1,2.

Материалом для исследований служили 10 лучших сортов риса: Командор, Южанин, Украина 96, Magic, Lotto, Виконт, Адмирал, Fukushikiri, Giza-177, Sakha 101. Растения были выращены в сортоиспытании в условиях орошения.

Орошение проведено по типу укороченного затопления. После посева риса чеки сразу заливали водой на 5 дней, после чего почву в чеках подсушивали до получения пол-

ных всходов. Второе затопление чеков начинали после получения полных всходов и начала роста растений риса и по мере их развития поднимали слой воды до уровня 15 см, после чего поддерживали его на этой отметке до полной спелости посевов.

Против сорняков в посевах риса применяли гербицид Цитадель 25 ЕД м.д. нормой 1.6 л/га с использованием опрыскивателя ОВМ-630. Против пирикуляриоза посевы обрабатывали фунгицидом Импакт К в количестве 1.6 л/га.

Перед дискованием пласта люцерны весной, в первой декаде апреля, вносили удобрения N90 (сульфат аммония) и P20 (суперфосфат простой). Подкормку растений риса проводили карбамидом (мочевина) в фазу кущения нормой N50 действующего вещества на 1 га. Предшественником была люцерна.

Посев осуществляли сеялкой СКС-6А с нормой высева 4.5 млн всхожих семян на 1 га. В 2013 г. к уборке сохранилось 101–105 растений на 1 га, в 2014 г. – 96–100, в 2016 г. – 93–98 растений на 1 га.

Площадь делянки – 5 м<sup>2</sup>, количество рядков – 6, между-рядья – 12.5 см. Количество повторений – 4. Урожай собирали селекционным комбайном Yanmar.

Структурный анализ по 50 растениям (с корнями) делали по 13 признакам для всех 10 сортов без исключения: продуктивность (масса зерна) растения, масса всей метелки, масса зерна с боковых стеблей, продуктивная кустистость, количество зерен в метелке, количество колосков в метелке, масса 1000 зерен, масса зерна с метелки, высота растения, длина и плотность метелки, количество пустых колосков в метелке, пустозерность.

Парные коэффициенты корреляции ( $r$ ) определяли между всеми 13 количественными признаками с использованием основ статистической обработки по (Доспехов, 1973). Путевой анализ проводили в соответствии с методикой S. Wright по работе А.Н. Седловского, С.П. Мартынова и Л.К. Мамонова (Седловский и др., 1982). Экспериментальные данные обрабатывали с использованием программного обеспечения Excel персонального компьютера.

Зависимость продуктивности от других признаков можно выразить через уравнение множественной регрессии

$$Y = Y_c + b_1 \cdot (X_1 - X_{1c}) + b_2 \cdot (X_2 - X_{2c}) + \dots + b_n \cdot (X_n - X_{nc}) + E, \quad (1)$$

где  $Y$  – продуктивность;  $Y_c$  – средняя статистическая продуктивность;  $X_1, X_2, X_n$  – значения 1-го, 2-го и  $n$ -го признаков соответственно;  $X_{1c}, X_{2c}, X_{nc}$  – среднее статистическое значение 1-го, 2-го и  $n$ -го признаков соответственно;  $b_1$  – коэффициент регрессии  $X_1$  на  $Y$ ;  $b_2$  – коэффициент регрессии  $X_2$  на  $Y$ ;  $b_n$  – коэффициент регрессии  $X_n$  на  $Y$ ;  $E$  – общая ошибка уравнения, которая включает и ошибку опыта.

Затем вводятся обозначения:

$$y = Y - Y_c; x_1 = X_1 - X_{1c}; x_2 = X_2 - X_{2c}; \dots; x_n = X_n - X_{nc},$$

а также рекомендованные изменения признаков от деления их на свои стандартные отклонения  $\sigma_i$ :

$$x_i = (X_i - X_{ic}) / \sigma_i \text{ для } i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где  $n$  – общее количество признаков, влияющих на продуктивность.

Тогда уравнение (1) принимает вид

$$y / \sigma_y = b_1 \cdot (\sigma_1 / \sigma_y) \cdot (x_1 / \sigma_1) + b_2 \cdot (\sigma_2 / \sigma_y) \cdot (x_2 / \sigma_2) + \dots + b_n \cdot (\sigma_n / \sigma_y) \cdot (x_n / \sigma_n) + \sigma_e / \sigma_y \cdot (E / \sigma_e). \quad (3)$$

Величину  $P_i = b_i \cdot (\sigma_i / \sigma_y)$  называют коэффициентом пути признака  $x_i$  к зависимой переменной  $y$  (в нашем случае – продуктивности). Таким образом, путевой коэффициент S. Wright (Райта) – это стандартизированный коэффициент регрессии независимого признака на зависимую функцию.

В отличие от коэффициента корреляции, путевой коэффициент является векторной величиной, т. е. имеет направление в системе признаков. Для нахождения значений путевых коэффициентов необходимо сначала рассчитать парные коэффициенты корреляций между признаками.

## Результаты

Установлены парные коэффициенты корреляций количественных признаков риса и путевые коэффициенты продуктивности растений.

### Корреляция количественных признаков риса

Установлен уровень взаимосвязей между 13 количественными признаками всех 10 сортов риса в 2013, 2014 и 2016 гг. по парным коэффициентам корреляции (табл. 1).

Основной признак растения – продуктивность (масса зерна) – достоверно положительно и очень тесно коррелировал во все три года с массой зерна с боковых стеблей ( $r = 0.99^*$ ;  $r = 0.99^*$ ;  $r = 0.99^*$ ; здесь и далее значения коэффициента корреляции  $r$  приведены для 2013, 2014 и 2016 гг. соответственно), т. е. отбор по этому признаку будет наиболее эффективным, средне – с массой зерна с метелки ( $r = 0.40^*$ ;  $r = 0.60^*$ ;  $r = 0.56^*$ ), массой всей метелки ( $r = 0.49^*$ ;  $r = 0.60^*$ ;  $r = 0.56^*$ ) и кустистостью ( $r = 0.55^*$ ;  $r = 0.32$ ;  $r = 0.34$ ), однако отрицательно коррелировал с количеством пустых колосков ( $r = -0.12$ ;  $r = -0.25$ ;  $r = -0.44^*$ ) и пустозерностью ( $r = -0.14$ ;  $r = -0.22$ ;  $r = -0.45^*$ ).

Продуктивность (масса зерна) метелки как один из структурных элементов продуктивности растения имела очень тесную положительную корреляцию с массой всей метелки ( $r = 0.99^*$ ;  $r = 0.99^*$ ;  $r = 0.99^*$ ) и массой зерна с боковых стеблей ( $r = 0.90^*$ ;  $r = 0.87^*$ ;  $r = 0.89^*$ ), по которым отбор будет наиболее эффективным, среднюю – с продуктивностью растения ( $r = 0.40^*$ ;  $r = 0.60^*$ ;  $r = 0.56^*$ ), количеством зерен в метелке ( $r = 0.53^*$ ;  $r = 0.61^*$ ;  $r = 0.78^*$ ) и количеством колосков в метелке ( $r = 0.53^*$ ;  $r = 0.61^*$ ;  $r = 0.78^*$ ), однако отрицательную – с продуктивной кустистостью ( $r = -0.36$ ;  $r = -0.50^*$ ;  $r = -0.22$ ) и пустозерностью ( $r = -0.33$ ;  $r = -0.32$ ;  $r = -0.41^*$ ).

Продуктивная кустистость средне коррелировала с массой зерна с боковых стеблей ( $r = 0.66^*$ ;  $r = 0.56^*$ ;  $r = 0.46^*$ ) и продуктивностью растений ( $r = 0.55^*$ ;  $r = 0.32$ ;  $r = 0.34$ ), а отрицательно (достоверно в 2014 г.) – с массой всей метелки ( $r = -0.25$ ;  $r = -0.50^*$ ;  $r = -0.22$ ), количеством колосков в метелке ( $r = -0.24$ ;  $r = -0.41^*$ ;  $r = -0.26$ ), количеством зерен в метелке ( $r = -0.24$ ;  $r = -0.41^*$ ;  $r = 0.25$ ) и массой зерна с метелки ( $r = -0.36$ ;  $r = -0.50^*$ ;  $r = -0.22$ ).

Длина метелки имела положительную корреляцию с массой зерна с боковых стеблей ( $r = 0.94^*$ ;  $r = 0.89^*$ ;

**Table 1.** Correlation coefficients of quantitative traits in 10 rice varieties

No.	Year	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2013	0.13	0.16	0.27	0.31	0.39	-0.07	-0.06	0.01	0.14	0.21	-0.04	-0.23
	2014	-0.12	0.04	-0.05	-0.03	0.31	-0.06	-0.06	0.01	0.04	0.01	-0.02	-0.20
	2016	-0.09	0.47*	-0.06	0.08	0.54*	0.10	0.12	-0.06	0.47*	0.53*	-0.07	-0.26
2	2013		-0.25	0.66	0.55*	0.18	-0.24	-0.24	0.23	-0.36	-0.01	0.23	-0.31
	2014		-0.50*	0.56*	0.32	-0.15	-0.41*	-0.41*	0.42*	-0.50*	0.08	0.39	-0.32
	2016		-0.22	0.46*	0.34	0.03	-0.26	-0.25	0.12	-0.22	0.08	0.18	-0.21
3	2013			0.15	0.49*	-0.24	0.52*	0.52*	-0.55*	0.99*	0.22	-0.54*	0.64*
	2014			0.36	0.60*	0.04	0.61*	0.61*	-0.57*	1.00*	0.03	-0.51*	0.55*
	2016			0.32	0.56*	0.22	0.64*	0.78*	-0.63*	1.00*	0.34	-0.68*	0.38
4	2013				0.99*	0.94*	0.96*	0.96*	0.94*	0.90*	0.95*	0.92*	0.97*
	2014				0.99*	0.89*	0.93*	0.92*	0.90*	0.87*	0.87*	0.86*	0.92*
	2016				0.99*	0.96*	0.98*	0.98*	0.97*	0.89*	0.98*	0.97*	0.95*
5	2013					-0.04	0.07	0.07	-0.12	0.40*	0.22	-0.14	0.14
	2014					-0.07	0.27	0.27	-0.25	0.60*	0.11	-0.22	0.28
	2016					-0.01	0.39	0.50*	-0.44*	0.56*	0.14	-0.45*	0.32
6	2013						0.11	0.12	-0.16	-0.25	-0.34	-0.17	-0.40*
	2014						0.15	0.15	-0.13	0.04	-0.13	-0.11	-0.33
	2016						0.14	0.06	0.09	0.22	0.13	0.05	-0.56*
7	2013							0.99*	-0.94*	0.53*	-0.66*	-0.87*	0.84*
	2014							0.99*	-0.91*	0.61*	-0.59*	-0.81*	0.87*
	2016							0.90*	-0.28	0.64*	-0.38	-0.42*	0.73*
8	2013								-0.96*	0.53*	-0.66*	-0.89*	0.84*
	2014								-0.93*	0.61*	-0.62*	-0.84*	0.87*
	2016								-0.68*	0.78*	-0.31	-0.78*	0.70*
9	2013									-0.34	0.39	0.61*	-0.48*
	2014									-0.36	0.47*	0.60*	-0.52*
	2016									-0.37	0.03	0.57*	-0.19
10	2013										0.12	-0.33	0.39
	2014										0.02	-0.32	0.35
	2016										0.20	-0.41*	0.24
11	2013											0.37	-0.23
	2014											0.49*	-0.34
	2016											0.08	-0.24
12	2013												-0.44*
	2014												-0.46*
	2016												-0.24

1, Plant height; 2, tillering capacity; 3, panicle weight; 4, grain weight from side stems; 5, productivity (grain weight per plant); 6, panicle length; 7, spikelet number per panicle; 8, grain number per panicle; 9, number of empty spikelets per panicle; 10, grain weight per panicle; 11, 1000-grain weight; 12, incidence of blind seed disease; 13, panicle density. \*The correlation coefficient is significant at 5%.

$r = 0.96^*$ ), однако отрицательную – с плотностью метелки ( $r = -0.40^*$ ;  $r = -0.33$ ;  $r = -0.56^*$ ).

Количество зерен в метелке положительно коррелировало с плотностью метелки ( $r = 0.84^*$ ;  $r = 0.87^*$ ;  $r = 0.70^*$ ), массой зерна с боковых стеблей ( $r = 0.96^*$ ;  $r = 0.92^*$ ;  $r = 0.98^*$ ) и количеством колосков в метелке ( $r = 0.99^*$ ;  $r = 0.99^*$ ;  $r = 0.90^*$ ), средне – с продуктивностью метелки ( $r = 0.53^*$ ;  $r = 0.61^*$ ;  $r = 0.78^*$ ), а отрицательно – с коли-

чеством пустых колосков в метелке ( $r = -0.96^*$ ;  $r = -0.93^*$ ;  $r = -0.68^*$ ), пустозерностью ( $r = -0.89^*$ ;  $r = 0.84^*$ ;  $r = 0.78^*$ ) и массой 1000 зерен ( $r = -0.66^*$ ;  $r = -0.62^*$ ;  $r = -0.31$ ).

Масса 1000 зерен имела положительную корреляцию с массой зерна с боковых стеблей ( $r = 0.95^*$ ;  $r = 0.87^*$ ;  $r = 0.98^*$ ), однако отрицательную – с количеством колосков в метелке ( $r = -0.66^*$ ;  $r = -0.59^*$ ;  $r = -0.38$ ) и количеством зерен в метелке ( $r = -0.66^*$ ;  $r = -0.62^*$ ;  $r = -0.31$ ).

В результате определения парных коэффициентов корреляции установлено, что продуктивность растения, масса зерна с метелки, масса зерна с боковых стеблей положительно взаимосвязаны между собой.

Положительная связь получена также между массой метелки, количеством зерен в метелке и плотностью метелки, между массой зерна с метелки, количеством зерен и количеством колосков в метелке, между массой зерна с боковых стеблей и количеством колосков в метелке и плотностью метелки. Пустозерность отрицательно влияет на массу, количество зерен и колосков в метелке и через эти признаки – на плотность метелки.

### Путевой анализ продуктивности растений риса

Для определения путевых коэффициентов ( $P_j$ ) мы воспользовались линейным уравнением

$$\sum r_{ij} \cdot P_j = r_{yi}, \quad (4)$$

где  $P_j$  – путевой коэффициент от  $j$ -го признака к  $y$ ;  $r_{ij}$  – коэффициент корреляции между  $i$ -м и  $j$ -м признаками;  $r_{yi}$  – коэффициент корреляции между  $y$  и  $i$ -м признаком.

Затем с использованием значений коэффициентов корреляции за 2013 г. была составлена система из двенадцати уравнений (4) с двенадцатью неизвестными путевыми коэффициентами (прямыми эффектами признаков):  $P_1$  (высоты растения),  $P_2$  (кустистости),  $P_3$  (массы метелки),  $P_4$  (массы зерна с боковых стеблей),  $P_5$  (длины метелки),  $P_6$  (количества колосков в метелке),  $P_7$  (количества зерен в метелке),  $P_8$  (количества пустых колосков в метелке),  $P_9$  (массы зерна с метелки),  $P_{10}$  (массы 1000 зерен),  $P_{11}$  (пустозерности),  $P_{12}$  (плотности метелки) (см. рисунок).

С помощью доступного в интернете метода Гаусса (<https://planetcalc.ru/3571>) было найдено решение этой

системы линейных алгебраических уравнений, заданных в виде матрицы. Решением является вектор путевых коэффициентов за 2013 г. Аналогично мы получили вектор путевых коэффициентов за 2014 и 2016 гг. (табл. 2).

Подставив значения прямых эффектов  $P_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 12$ ), с помощью табличного компьютерного процессора Excel получили разложение корреляции между продуктивностью и каждым количественным признаком на прямой его эффект и косвенные эффекты других признаков всех 10 сортов (табл. 3).

Результаты были сведены в таблицу – матрицу путевых коэффициентов каждого признака к продуктивности растения: прямых эффектов каждого из них на продуктивность и побочных эффектов других признаков, которые составляют причинно-следственную систему. Структура матрицы соответствует системе двенадцати уравнений с 12 прямыми эффектами.

В результате путевого анализа продуктивности установлены прямые эффекты 12 признаков в их вкладе в уровень продуктивности (по центральной диагонали табл. 3), их косвенный эффект в связях продуктивности с другими признаками (по вертикали каждого из признаков, см. табл. 3), а также косвенный эффект других признаков в связях каждого из 12 признаков в отдельности с продуктивностью (по горизонтали каждого из признаков, см. табл. 3).

Наибольший прямой эффект на продуктивность (см. табл. 3) за 2013, 2014 и 2016 гг. наблюдался у признака «масса всей метелки» (0.51; 0.95; 0.75 соответственно по годам). Его косвенный эффект (по вертикали табл. 3) был положительным в связях продуктивности с высотой растения в 2016 г., массой зерна с боковых стеблей (2014, 2016 гг.), количеством колосков в метелке, количеством зе-

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.00 \cdot P_1 + 0.13 \cdot P_2 + 0.16 \cdot P_3 + 0.27 \cdot P_4 + 0.39 \cdot P_5 - 0.07 \cdot P_6 - 0.06 \cdot P_7 + 0.01 \cdot P_8 + 0.14 \cdot P_9 + 0.21 \cdot P_{10} - 0.04 \cdot P_{11} - 0.23 \cdot P_{12} = 0.31 \\ 0.13 \cdot P_1 + 1.00 \cdot P_2 - 0.25 \cdot P_3 + 0.66 \cdot P_4 + 0.18 \cdot P_5 - 0.24 \cdot P_6 - 0.24 \cdot P_7 + 0.23 \cdot P_8 - 0.36 \cdot P_9 - 0.01 \cdot P_{10} + 0.23 \cdot P_{11} - 0.31 \cdot P_{12} = 0.55 \\ 0.16 \cdot P_1 - 0.25 \cdot P_2 + 1.00 \cdot P_3 + 0.15 \cdot P_4 - 0.24 \cdot P_5 + 0.52 \cdot P_6 + 0.52 \cdot P_7 - 0.55 \cdot P_8 + 0.99 \cdot P_9 + 0.22 \cdot P_{10} - 0.54 \cdot P_{11} + 0.64 \cdot P_{12} = 0.49 \\ 0.27 \cdot P_1 + 0.66 \cdot P_2 + 0.15 \cdot P_3 + 1.00 \cdot P_4 - 0.94 \cdot P_5 + 0.96 \cdot P_6 + 0.96 \cdot P_7 + 0.94 \cdot P_8 + 0.90 \cdot P_9 + 0.95 \cdot P_{10} + 0.92 \cdot P_{11} + 0.97 \cdot P_{12} = 0.99 \\ 0.39 \cdot P_1 + 0.18 \cdot P_2 - 0.24 \cdot P_3 + 0.94 \cdot P_4 + 1.00 \cdot P_5 + 0.11 \cdot P_6 + 0.12 \cdot P_7 - 0.16 \cdot P_8 - 0.25 \cdot P_9 - 0.34 \cdot P_{10} - 0.17 \cdot P_{11} + 0.40 \cdot P_{12} = -0.04 \\ -0.07 \cdot P_1 - 0.24 \cdot P_2 + 0.52 \cdot P_3 + 0.96 \cdot P_4 + 0.11 \cdot P_5 + 1.00 \cdot P_6 + 0.99 \cdot P_7 - 0.94 \cdot P_8 + 0.53 \cdot P_9 - 0.66 \cdot P_{10} - 0.87 \cdot P_{11} + 0.84 \cdot P_{12} = 0.07 \\ -0.06 \cdot P_1 - 0.24 \cdot P_2 + 0.52 \cdot P_3 + 0.96 \cdot P_4 + 0.12 \cdot P_5 + 0.99 \cdot P_6 + 1.00 \cdot P_7 - 0.96 \cdot P_8 + 0.53 \cdot P_9 - 0.66 \cdot P_{10} - 0.89 \cdot P_{11} + 0.84 \cdot P_{12} = 0.07 \\ 0.01 \cdot P_1 + 0.23 \cdot P_2 - 0.55 \cdot P_3 + 0.94 \cdot P_4 - 0.16 \cdot P_5 - 0.94 \cdot P_6 - 0.96 \cdot P_7 + 1.00 \cdot P_8 - 0.34 \cdot P_9 + 0.39 \cdot P_{10} + 0.61 \cdot P_{11} - 0.48 \cdot P_{12} = -0.12 \\ 0.14 \cdot P_1 - 0.36 \cdot P_2 + 0.99 \cdot P_3 + 0.90 \cdot P_4 - 0.25 \cdot P_5 + 0.53 \cdot P_6 + 0.53 \cdot P_7 - 0.34 \cdot P_8 + 1.00 \cdot P_9 + 0.12 \cdot P_{10} - 0.33 \cdot P_{11} + 0.39 \cdot P_{12} = 0.40 \\ 0.21 \cdot P_1 - 0.01 \cdot P_2 + 0.22 \cdot P_3 + 0.95 \cdot P_4 - 0.25 \cdot P_5 - 0.66 \cdot P_6 - 0.66 \cdot P_7 + 0.39 \cdot P_8 + 0.12 \cdot P_9 + 1.00 \cdot P_{10} + 0.37 \cdot P_{11} - 0.23 \cdot P_{12} = 0.22 \\ -0.04 \cdot P_1 + 0.23 \cdot P_2 - 0.54 \cdot P_3 + 0.92 \cdot P_4 - 0.17 \cdot P_5 - 0.87 \cdot P_6 - 0.89 \cdot P_7 + 0.61 \cdot P_8 - 0.33 \cdot P_9 + 0.37 \cdot P_{10} + 1.00 \cdot P_{11} - 0.44 \cdot P_{12} = -0.14 \\ -0.23 \cdot P_1 - 0.31 \cdot P_2 + 0.64 \cdot P_3 + 0.97 \cdot P_4 - 0.40 \cdot P_5 + 0.84 \cdot P_6 + 0.84 \cdot P_7 - 0.48 \cdot P_8 + 0.39 \cdot P_9 - 0.23 \cdot P_{10} - 0.44 \cdot P_{11} + 1.00 \cdot P_{12} = 0.14 \end{array} \right.$$

The system of 12 equations with 12 variables, 2013.

**Table 2.** Path coefficients ( $P_j$ ) of the  $j^{\text{th}}$  trait on  $y$  (productivity of all 10 varieties)

Year	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$
2013	0.12	0.72	0.51	-0.01	-0.02	-0.01	0.09	0.08	0.11	0.11	0.02	0.02
2014	0.03	0.85	0.95	-0.01	0.01	-0.06	0.16	0.01	0.03	0.08	-0.01	-0.01
2016	-0.17	0.52	0.75	-0.03	0.25	-0.73	0.42	0.13	0.12	-0.17	0.09	0.47

**Table 3.** Results of the path analysis of the productivity of all 10 rice varieties

No.	Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	P <sub>0</sub>	13
1	2013	<b>0.1200</b>	0.0936	0.0816	-0.0027	-0.0078	0.0007	-0.0054	0.0008	0.0154	0.0231	-0.0008	-0.0046	-0.0039	<b>0.31</b>
	2014	<b>0.0300</b>	-0.1020	0.0380	0.0005	0.0031	0.0036	-0.0096	0.0001	0.0012	0.0008	0.0002	0.0020	0.0021	<b>-0.03</b>
	2016	<b>-0.1700</b>	-0.0468	0.3525	0.0018	0.1350	-0.0730	0.0504	-0.0078	0.0564	-0.0901	-0.0063	-0.1222	0.0001	<b>0.08</b>
2	2013	0.0156	<b>0.7200</b>	-0.1275	-0.0066	-0.0036	0.0024	-0.0216	0.0184	-0.0396	-0.0011	0.0046	-0.0062	-0.0048	<b>0.55*</b>
	2014	-0.0036	<b>0.8500</b>	-0.4750	-0.0056	-0.0015	0.0246	-0.0656	0.0042	-0.0150	0.0064	-0.0039	0.0032	0.0018	<b>0.32</b>
	2016	0.0153	<b>0.5200</b>	-0.1650	-0.0138	0.0075	0.1898	-0.1050	0.0156	-0.0264	-0.0136	0.0162	-0.0987	-0.0019	<b>0.34</b>
3	2013	0.0192	-0.1800	<b>0.5100</b>	-0.0015	0.0048	-0.0052	0.0468	-0.0440	0.1089	0.0242	-0.0108	0.0128	0.0048	<b>0.49*</b>
	2014	0.0012	-0.4250	<b>0.9500</b>	-0.0036	0.0004	-0.0366	0.0976	-0.0057	0.0300	0.0024	0.0051	-0.0055	-0.0103	<b>0.60*</b>
	2016	-0.0799	-0.1144	<b>0.7500</b>	-0.0096	0.0550	-0.4672	0.3276	-0.0819	0.1200	-0.0578	-0.0612	0.1786	0.0008	<b>0.56*</b>
4	2013	0.0324	0.4752	0.0765	<b>-0.0100</b>	-0.0188	-0.0096	0.0864	0.0752	0.0990	0.1045	0.0184	0.0194	0.0414	<b>0.99*</b>
	2014	-0.0015	0.4760	0.3420	<b>-0.0100</b>	0.0089	-0.0558	0.1472	0.0090	0.0261	0.0696	-0.0086	-0.0092	-0.0037	<b>0.99*</b>
	2016	0.0102	0.2392	0.2400	<b>-0.0300</b>	0.2400	-0.7154	0.4116	0.1261	0.1068	-0.1666	0.0873	0.4465	-0.0057	<b>0.99*</b>
5	2013	0.0468	0.1296	-0.1224	-0.0094	<b>-0.0200</b>	-0.0011	0.0108	-0.0128	-0.0275	-0.0374	-0.0034	-0.0080	0.0148	<b>-0.04</b>
	2014	0.0093	-0.1275	0.0380	-0.0089	<b>0.0100</b>	-0.0090	0.0240	-0.0013	0.0012	-0.0104	0.0011	0.0033	0.0002	<b>-0.07</b>
	2016	-0.0918	0.0156	0.1650	-0.0288	<b>0.2500</b>	-0.1022	0.0252	0.0117	0.0264	-0.0221	0.0045	-0.2632	-0.0003	<b>-0.01</b>
6	2013	-0.0084	-0.1728	0.2652	-0.0096	-0.0022	<b>-0.0100</b>	0.0891	-0.0752	0.0583	-0.0726	-0.0174	0.0168	0.0088	<b>0.07</b>
	2014	-0.0018	-0.3485	0.5795	-0.0093	0.0015	<b>-0.0600</b>	0.1584	-0.0091	0.0183	-0.0472	0.0081	-0.0087	-0.0112	<b>0.27</b>
	2016	-0.0170	-0.1352	0.4800	-0.0294	0.0350	<b>-0.7300</b>	0.3780	-0.0364	0.0768	0.0646	-0.0378	0.3431	-0.0017	<b>0.39</b>
7	2013	-0.0072	-0.1728	0.2652	-0.0096	-0.0024	-0.0099	<b>0.0900</b>	-0.0768	0.0583	-0.0726	-0.0178	0.0168	0.0088	<b>0.07</b>
	2014	-0.0018	-0.3485	0.5795	-0.0092	0.0015	-0.0594	<b>0.1600</b>	-0.0093	0.0183	-0.0496	0.0084	-0.0087	-0.0112	<b>0.27</b>
	2016	-0.0204	-0.1300	0.5850	-0.0294	0.0150	-0.6570	<b>0.4200</b>	-0.0884	0.0936	0.0527	-0.0702	0.3290	0.0001	<b>0.50*</b>
8	2013	0.0012	0.1656	-0.2805	-0.0094	0.0032	0.0094	-0.0864	<b>0.0800</b>	-0.0374	0.0429	0.0122	-0.0096	-0.0112	<b>-0.12</b>
	2014	0.0003	0.3570	-0.5415	-0.0090	-0.0013	0.0546	-0.1488	<b>0.0100</b>	-0.0108	0.0376	-0.0060	0.0052	0.0027	<b>-0.25</b>
	2016	0.0102	0.0624	-0.4725	-0.0291	0.0225	0.2044	-0.2856	<b>0.1300</b>	-0.0444	-0.0051	0.0513	-0.0893	0.0052	<b>-0.44*</b>
9	2013	0.0168	-0.2592	0.5049	-0.0090	0.0050	-0.0053	0.0477	-0.0272	<b>0.1100</b>	0.0132	-0.0066	0.0078	0.0019	<b>0.40</b>
	2014	0.0012	-0.4250	0.9500	-0.0087	0.0004	-0.0366	0.0976	-0.0036	<b>0.0300</b>	0.0016	0.0032	-0.0035	-0.0066	<b>0.60*</b>
	2016	-0.0799	-0.1144	0.7500	-0.0267	0.0550	-0.4672	0.3276	-0.0481	<b>0.1200</b>	-0.0340	-0.0369	0.1128	0.0018	<b>0.56*</b>
10	2013	0.0252	-0.0072	0.1122	-0.0095	0.0050	0.0066	-0.0594	0.0312	0.0132	<b>0.1100</b>	0.0074	-0.0046	-0.0101	<b>0.22</b>
	2014	0.0003	0.0680	0.0285	-0.0087	0.0004	0.0354	-0.0992	0.0047	0.0006	<b>0.0800</b>	-0.0049	0.0034	0.0015	<b>0.11</b>
	2016	-0.0901	0.0416	0.2550	-0.0294	0.0550	0.2774	-0.1302	0.0039	0.0240	<b>-0.1700</b>	0.0072	-0.1128	0.0084	<b>0.14</b>
11	2013	-0.0048	0.1656	-0.2754	-0.0092	0.0034	0.0087	-0.0801	0.0488	-0.0363	0.0407	<b>0.0200</b>	-0.0088	-0.0126	<b>-0.14</b>
	2014	-0.0006	0.3315	-0.4845	-0.0086	-0.0011	0.0486	-0.1344	0.0060	-0.0096	0.0392	<b>-0.0100</b>	0.0046	-0.0011	<b>-0.22</b>
	2016	0.0119	0.0936	-0.5100	-0.0291	0.0125	0.3066	-0.3276	0.0741	-0.0492	-0.0136	<b>0.0900</b>	-0.1128	0.0036	<b>-0.45*</b>
12	2013	-0.0276	-0.2232	0.3264	-0.0097	0.0080	-0.0084	0.0756	-0.0384	0.0429	-0.0253	-0.0088	<b>0.0200</b>	0.0085	<b>0.14</b>
	2014	-0.0060	-0.2720	0.5225	-0.0092	-0.0033	-0.0522	0.1392	-0.0052	0.0105	-0.0272	0.0046	<b>-0.0100</b>	-0.0117	<b>0.28</b>
	2016	0.0442	-0.1092	0.2850	-0.0285	-0.1400	-0.5329	0.3066	-0.0247	0.0288	0.0408	-0.0216	<b>0.4700</b>	0.0015	<b>0.32</b>

1, Plant height; 2, tillering capacity; 3, panicle weight; 4, grain weight from side stems; 5, panicle length; 6, spikelet number per panicle; 7, grain number per panicle; 8, empty spikelet number per panicle; 9, grain weight per panicle; 10, 1000-grain weight; 11, incidence of blind seed disease; 12, panicle density; 13, productivity (grain weight per plant); P<sub>0</sub>, unaccounted (residual) factors (2013: min = -0.0126, max = 0.0414; 2014: min = -0.0117; max = 0.0027; 2016: min = -0.0057, max = 0.0084).

\* The correlation coefficient is significant at 5 %.

рен в метелке, массой зерна с метелки, массой 1 000 зерен и плотностью метелки, однако отрицательным – в связях продуктивности с кустистостью, количеством пустых колосков в метелке и пустозерностью. В связях признака «масса всей метелки» с продуктивностью (по горизонтали табл. 3) положительным был косвенный эффект

признаков «масса зерна с метелки» и «количество зерен в метелке», а отрицательным – кустистости, что с учетом большого прямого эффекта массы метелки выразилось в достоверной средней корреляции последней с продуктивностью ( $r = 0.49; 0.60; 0.56$ ). Прямой (-0.01; -0.01; -0.03) и косвенные эффекты признака «масса зерна с боковых

побегов» незначимы. А очень тесная положительная корреляция этого признака с продуктивностью (0.99; 0.99; 0.99) была обусловлена во все три года косвенным эффектом кустистости, в 2013 г. – еще и массой 1000 зерен, в 2014 г. – и массой метелки, и количеством зерен с метелки, в 2016 г. – массой метелки, длиной метелки, количеством зерен с метелки, массой зерна с метелки и плотностью метелки. Слабый прямой эффект влияния на продуктивность оказывал признак «масса зерна с метелки» (0.11; 0.03; 0.12), несущественным был также и его косвенный эффект в связях продуктивности с другими признаками. Однако в связях признака «масса зерна с метелки» с продуктивностью положительным был большой косвенный эффект признака «масса всей метелки» при небольшом отрицательном косвенном эффекте кустистости, что в итоге выразилось в среднем положительном достоверном парном коэффициенте корреляции массы зерна с метелки с продуктивностью (0.40; 0.60; 0.56).

Большим был прямой эффект признака «кустистость» (0.72; 0.85; 0.52), положительными оказались также его косвенные эффекты в связях продуктивности с массой зерна с боковых побегов, однако отрицательными – с массой всей метелки, массой зерна с метелки и количеством колосков и зерен в метелке. В связях кустистости с продуктивностью положительные косвенные эффекты других признаков были незначительными, а отрицательный эффект массы всей метелки был небольшим, что в итоге сказалось на средней положительной величине парной корреляции между кустистостью и продуктивностью (0.55; 0.32; 0.34).

По признаку «масса 1000 зерен» прямой эффект был слабым (0.11; 0.08; –0.17), побочный – незначительным, а косвенный эффект большинства других признаков – невысоким положительным, в результате чего коэффициент парной корреляции между массой 1000 зерен и продуктивностью оказался низким (0.22; 0.11; 0.14). Неодинаковый уровень прямого эффекта на продуктивность наблюдался по признаку «плотность метелки»: незначительный в 2013 (0.02) и 2014 гг. (–0.01) при незначительном косвенном эффекте и при невысоком косвенном эффекте большинства других признаков, однако в 2016 г. прямой эффект был положительным (0.47) при незначительном косвенном эффекте признака и положительном косвенном эффекте отдельных других признаков (масса всей метелки, количество зерен в метелке), но отрицательным эффектом большинства других признаков, что выразилось в низких, хотя и положительных парных коэффициентах корреляции плотности метелки с продуктивностью (0.14; 0.28; 0.32).

Признак «высота растений» не имел значительного как прямого (к тому же разнонаправленного по годам – 0.12; 0.03; –0.17), так и косвенного влияния на продуктивность. Оно сказалось через небольшие положительные побочные эффекты ряда других признаков: в 2013 г. – кустистости, массы всей метелки, массы зерна с метелки и массы 1000 зерен, что выразилось в среднем парном коэффициенте корреляции между высотой и продуктивностью (0.31), а в 2014 г. – только массы всей метелки при отсутствии корреляции (–0.03), в 2016 г. – массы всей метелки и длины метелки, однако при значении прямого

коэффициента пути –0.17 корреляция между высотой и продуктивностью практически отсутствовала (0.08).

Пустозерность тоже практически не имела прямого (0.02; –0.01; 0.09) и косвенного влияния на продуктивность, однако в связи с отрицательным косвенным эффектом других признаков (особенно массы всей метелки и количества зерен в метелке) парные коэффициенты корреляции между пустозерностью и продуктивностью были отрицательными, хотя и незначимыми в 2013 и 2014 гг. (–0.14; –0.22; –0.45).

Длина метелки в 2013 и 2014 гг. практически не оказывала значимого как прямого (–0.02; 0.01), так и косвенного эффекта на продуктивность, а положительный косвенный эффект кустистости был компенсирован отрицательным влиянием массы всей метелки и других признаков, в результате чего парные коэффициенты корреляции между длиной метелки и продуктивностью растения оказались практически нулевыми (–0.04; –0.07). В 2016 г., напротив, прямой эффект длины метелки был на уровне 0.25, а косвенный эффект в связях продуктивности с высотой и массой зерна с боковых побегов – положительным. Однако из-за отрицательного косвенного эффекта других признаков (плотность метелки, высота, количество колосков в метелке, масса 1000 зерен) парный коэффициент корреляции между длиной метелки и продуктивностью оказался практически нулевым (–0.01).

Признак «количество зерен в метелке» в 2013 и 2014 гг. не имел большого прямого (0.09; 0.16) и значимого побочного эффектов на продуктивность, и хотя косвенный эффект массы всей метелки был положительным, однако по большинству других признаков в 2013 г. он получен отрицательным, и в результате корреляция между количеством зерен в метелке и продуктивностью в 2013 г. оказалась незначимой (0.07). В 2014 г. отрицательные эффекты были менее значимы, и соответственно увеличился и коэффициент корреляции (0.27). В 2016 г. прямой эффект признака «количество зерен в метелке» составил 0.42 при положительном косвенном эффекте признака в связях продуктивности с массой всей метелки, массой зерна с боковых побегов, количеством колосков в метелке, массой зерна с метелки и плотностью метелки, а также при значительном косвенном эффекте массы всей метелки и плотности метелки, что выразилось в достоверном среднем парном коэффициенте корреляции между признаком «количество зерен в метелке» и продуктивностью растения (0.50).

Как прямой эффект признака «количество колосков в метелке» (–0.01), так и его побочные эффекты в 2013 г. были незначимыми, и хотя косвенный эффект признака «масса всей метелки» был положительным, однако из-за отрицательных косвенных эффектов большинства других признаков корреляция между количеством колосков в метелке и продуктивностью растения практически отсутствовала (0.07). В 2014 г. его значение составило 0.27, так как были положительными косвенные эффекты признаков «масса всей метелки» и «количество зерен в метелке», хотя прямой (–0.06) и косвенный эффекты признака «количество колосков в метелке» были незначимыми. В 2016 г. во влиянии признака «количество зерен в метелке» на продуктивность наблюдалась совсем иная закономерность:

прямой эффект был очень отрицательным, отрицательным был также побочный эффект его в связях продуктивности с массой всей метелки, массой зерна с боковых колосков, длиной метелки, количеством зерен в метелке, массой зерна с метелки и плотностью метелки. Отмечен положительный эффект с кустистостью, количеством пустых колосков в метелке, пустозерностью и массой 1 000 зерен, однако вследствие положительного косвенного эффекта других признаков (масса всей метелки, количество зерен в метелке, плотность метелки) парный коэффициент корреляции между изучаемым признаком и продуктивностью был средним (0.39).

Признаки «количество пустых колосков в метелке» и «пустозерность» практически не имели ни прямого, ни косвенного влияния на продуктивность растения, однако в связи с отрицательным косвенным эффектом ряда других признаков (особенно массы всей метелки и количества зерен в метелке) парный коэффициент корреляции был отрицательным.

### Обсуждение

В исследованиях многих авторов показана целесообразность определения взаимосвязей между признаками растений различных культур, в том числе риса, с помощью как парных коэффициентов корреляции, так и путевых коэффициентов. В частности, установлены неодинаковые прямые и косвенные вклады отдельных признаков в их влияние на продуктивность риса (Samonte et al., 1998; Sürek, Beşer, 2003; Ekka et al., 2011).

В наших исследованиях найдены особенности взаимосвязей между различными признаками растений риса по парным коэффициентам корреляции, а также причинно-следственные зависимости в системе взаимосвязанных признаков в результате путевого анализа продуктивности растений. Установлено, что продуктивность растения, масса зерна с метелки и масса зерна с боковых стеблей положительно связаны между собой. Кроме того, положительная взаимосвязь наблюдалась между массой всей метелки, количеством зерен в метелке и плотностью метелки; между массой зерна с метелки, количеством зерен в метелке и количеством колосков в метелке; а также между массой зерна с боковых стеблей, количеством зерен в метелке, количеством колосков в метелке и плотностью метелки. Пустозерность отрицательно влияет на массу всей метелки, количество зерен в метелке, количество колосков в метелке и посредством этих признаков на плотность метелки. На массу 1 000 зерен отрицательно влияют количество зерен и количество колосков в метелке.

В результате путевого анализа продуктивности растений риса решен комплекс задач в системе причинно-следственной взаимосвязи признаков: установлен относительный вклад каждого из 12 признаков на продуктивность, причем как прямой (непосредственный), так и косвенный (побочный) эффекты при взаимодействии с другими признаками. Это дало возможность раскрыть причины взаимозависимостей между признаками и выделить признаки, с помощью которых целесообразно прогнозировать продуктивность растений.

Установлено, что уровень корреляции между показателями продуктивности и другими признаками растений

неодинаково зависит как от прямого и косвенных эффектов влияния отдельного признака на продуктивность в связях продуктивности с другими признаками, так и от косвенных эффектов влияния других признаков в связях продуктивности с изучаемым отдельным признаком.

Уровень прямого эффекта влияния каждого отдельного признака на продуктивность неодинаков и может быть высоким положительным во все годы (масса всей метелки, кустистость) или в отдельный наиболее благоприятный по погодным условиям 2016 г. (плотность метелки, количество зерен в метелке, длина метелки), очень низким в благоприятный год (количество колосков в метелке) или незначимым (по остальным признакам).

Уровни каждого из косвенных (побочных) эффектов влияния каждого отдельного признака в связях продуктивности с другими признаками, а также косвенных эффектов других признаков в связях продуктивности с изученным отдельным признаком могут быть разными, даже противоположного направления, и зависят от погодных условий выращивания растений. К тому же уровень прямого эффекта влияния отдельных признаков на продуктивность растений не всегда одинаково влияет на уровень парных коэффициентов корреляции между ними и продуктивностью, так как в данном случае проявляется зависимость и от соотношения косвенных эффектов влияния других признаков на продуктивность.

### Выводы

В результате путевого анализа продуктивности определена наибольшая селекционная ценность отдельных количественных признаков растений риса, которые могут быть детерминантными для отбора и прогноза уровня продуктивности растений:

- масса всей метелки, которая во все три года имела высокие прямой и в некоторой степени косвенный эффекты влияния на продуктивность и для которой получена достоверная положительная парная корреляция с продуктивностью;
- продуктивная кустистость, которая также во все годы имела высокие прямой и косвенный эффекты влияния на продуктивность и положительную парную корреляцию с продуктивностью.

### Список литературы / References

- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований), 5-е изд., доп. М.: Агропромиздат, 1985.  
[Dospikhov B.A. Methods of Field Experiment (with the basics of the statistical processing of research results). Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. (in Russian)]
- Мухордова М.Е. Взаимосвязь элементов качества с продуктивностью растений у пивоваренного ячменя. Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та. 2011;7(81):23-26.  
[Muhordova M.E. The relationship of quality indices with plant productivity in malting barley. Vestnik Altayskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta = Bulletin of the Altai State Agricultural University. 2011;7(81):23-26. (in Russian)]
- Мухордова М.Е. Корреляционный и путевой анализ признаков продуктивности гибридов озимой пшеницы. Вестн. Алт. гос. аграр. ун-та. 2014;6(116):14-18.  
[Muhordova M.E. Correlation and path analysis of production characters in winter wheat hybrids. Vestnik Altayskogo Gosudarst-

- vennogo Agrarnogo Universiteta = Bulletin of the Altai State Agricultural University. 2014;6(116):14-18. (in Russian)]
- Мухордова М.Е., Калашник Н.А. О корреляционном и путевом анализе элементов продуктивности гибридов F1 яровой мягкой пшеницы. С.-х. биология. 2010;3:54-59.  
[Muhordova M.E., Kalashnik N.A. Correlation and path analyses of performance elements in spring wheat F1 hybrids. Selskokhozyaystvennaya Biologiya = Agricultural Biology. 2010;3:54-59. (in Russian)]
- Орлюк А.П., Вожегова Р.А., Шпак Д.В., Шпак Т.М., Цілінко М.І. Ефективність добору за кількісними ознаками на різних етапах селекції рису. Бюлетень Інституту зернового господарства УААН. 2008;33/34:50-52.  
[Orliuk A.P., Vozhegova R.A., Shpak D.V., Shpak T.N., Tsilynko M.I. The efficiency of selection on quantitative traits in various stages of rice breeding. Buletin Instytutu Zernovogo Gospodarstva = Bulletin of the Institute of Grain Industry, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. 2008;33/34: 50-52. (in Ukrainian)]
- Орлюк А.П., Шпак Т.М., Шпак Д.В. Кореляційні взаємозв'язки ознаки продуктивності головної волоті у гібридних популяціях рису. Зрошуване землеробство. 2011;55:140-144.  
[Orliuk A.P., Shpak T.M., Shpak D.V. Correlational relationships among performance indices in the main panicle of hybrid rice populations. Zroshuvane Zemlerobstvo = Irrigated Farming. 2011;55: 140-144. (in Ukrainian)]
- Седловский А.И., Мартынов С.П., Мамонов Л.К. Генетико-статистические подходы к теории селекции самоопыляющихся культур. Алма-Ата, 1982.  
[Sedlovskii A.I., Martynov S.P., Mamonov L.K. Methods of Genetic Statistics in Theories of Self-Pollinating Crop Breeding. Alma-Ata, 1982. (in Russian)]
- Сичкарь В.И. Путевой анализ семенной продуктивности у сои. Науч.-техн. бюл. ВСГИ ВАСХНИЛ. 1998;1(67):30-35.  
[Sichkar V.I. Path analysis in soybean seed production. Nauchno-Tekhnicheskii Byulleten VSGI VASHNIL = Scientific and Technical Bulletin of the All-Union Institute of Breeding and Genetics, All-Union Academy of Agricultural Sciences. 1998;1(67):30-35. (in Russian)]
- Шпак Т.М. Кореляційні зв'язки ознак продуктивності та якості зерна у ранньостиглих форм рису. Зб. матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених (25 квітня 2013 р.). Херсон: ІЗЗ НААН. 2013;35-37.  
[Shpak T.N. Correlation characteristics of productivity and quality of grain in early-formed rice varieties. Proceeding of the International Scientific Conference of Young Scientists (April 25, 2013). Kherson: Institute of Irrigated Farming, NAAS Ukraine Publ., 2013; 35-37. (in Ukrainian)]
- Akdeniz H., Keskin B., Yilmaz I., Oral E. A research on yield and yield components of some barley cultivars. J. Agric. Sci. 2004;14(2): 119-125.
- Akhtar N., Nazir M.F., Rabnawaz A., Mahmood T., Safdar M.E., Asif M., Rehman A. Estimation of heritability, correlation and path coefficient analysis in fine grain rice (*Oryza sativa* L.) J. Anim. Plant Sci. 2011;21(4):660-664.
- Akinwale M.G., Gregorio G., Nwilene F., Akinyele B.O., Ogunbayo S.A., Odiyi A.C. Heritability and correlation coefficient analysis for yield and its components in rice (*Oryza sativa* L.). Afr. J. Plant Sci. 2011;5 (3):207-212.
- Ataei M. Path analysis of barley (*Hordeum vulgare* L.) yield. J. Agric. Sci. (Turkey). 2006;12(3):227-232.
- Aycicek M., Yildirim T. Path coefficient analysis of yield and yield components in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. Pak. J. Bot. 2006;38(2):417-424.
- Bagheri N., Babaeian-Jelodar N., Pasha A. Path coefficient analysis for yield and yield components in diverse rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. Biharean Biologist. 2011;5:32-35.
- Basavaraja T., Gangaprasad S., Dhushantha Kumar B.M., Hittlmani S.H. Correlation and path analysis of yield and yield attributes in local rice cultivars (*Oryza sativa* L.). Electron. J. Plant Breed. 2011;2(4):523-526.
- Bhadru D., Reddy D.L., Ramesha M.S. Correlation and path coefficient analysis of yield and yield contributing traits in rice hybrids and their parental lines. Electron. J. Plant Breed. 2011;2(1):112-116.
- Bhutta W.M., Barley T., Ibrahim M. Path-coefficient analysis of some quantitative characters in husked barley. Caderno de Pesquisa. Ser. Biol. 2005;17(1):65-70.
- Ekka R.E., Sarawgi A.K., Kanwar R.R. Correlation and path analysis in traditional rice accessions of Chhattisgarh. J. Rice Res. 2011; 4(1&2):11-18.
- Emine B.C., Necmettin C. Correlation and path coefficient analyses of grain yield and yield components in two-rowed of barley (*Hordeum vulgare* convar. *distichon*) varieties. Not. Sci. Biol. 2012;4(2):128-131.
- Finne M.A., Rognli O.A., Schjelderup I. Genetic variation in a norwegian germplasm collection of white clover (*Trifolium repens* L.): correlation and path coefficient analyses of agronomic characters, Euphytica. 2000;112:57-68.
- Haider Z., Khan A.S., Zia S. Correlation and path coefficient analysis of yield components in rice (*Oryza sativa* L.) under simulated drought stress condition. Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 2012; 12(1):100-104.
- Hossain S., Maksudul Haque M., Rachman J. Genetic variability, correlation and path coefficient analysis of morphological traits in some extinct local Aman rice (*Oryza sativa* L.). J. Rice Res. 2015;4:2-6.
- Ilker E. Relationships between yield and yield components of barley crosses. J. Agric. Fac. Ege. Univ. 2006;43(3):1-11.
- Khan A.S., Imran M., Ashfaq M. Estimation of genetic variability and correlation for grain yield components in rice. Am.-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 2009;6(5):585-590.
- Mugemangango Cyprien, Vinod Kumar. Correlation and path coefficient analysis of rice cultivars data. Math. Sci. Res. J. 2011;4(2):15-20.
- Ratna M., Begum S., Husna A., Dey S.R., Hossai M.S. Correlation and path coefficients analyses in Basmati rice. Bangladesh J. Agric. Res. 2015;40(1):153-161.
- Samonte S.O., Wilson L.T., McClung M. Path analyses of yield and yield-related traits of fifteen diverse rice genotypes. Crop Sci. 1998; 38:1130-1136.
- Shahid M., Mohammad F., Tahir M. Path coefficient analysis in wheat. Sarhad J. Agric. 2002;18(4):383-388.
- Sinebo W. Yield relationships of barleys grown in a tropical highland environment. Crop Sci. 2002;42:428-437.
- Süreç H., Beşer N. Correlation and path coefficient analysis for some yield-related traits in rice (*Oryza sativa* L.) under Thrace conditions. Turk. J. Agric. For. 2003;27:77-83.
- Türk M., Çelik N., Bayram G., Budaklı E. Relationships between seed yield and yield components in carbon bean (*Vicia narbonensis* L.) by path analysis. Bangl. J. Bot. 2008;37(1):27-32.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

Received March 15, 2018. Revised February 28, 2019. Accepted March 2, 2019.