

ВЛИЯНИЕ РИЗОБАКТЕРИЙ, СТИМУЛИРУЮЩИХ РОСТ РАСТЕНИЙ (PGPR), НА РАЗЛИЧНЫЕ ПРИЗНАКИ АРАХИСА (*Arachis hypogaea* L.) В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРОПИЧЕСКОГО КЛИМАТА В ОКРУГЕ LASBELA, ПАКИСТАН

A. KARIM, M. WASEEM[✉], Q. SARFARAZ, H.T. ABBAS, W. BASHIR, G. KHALIQ, S.F. PANDRANI, S. ANWAR

Арахис (*Arachis hypogaea* L.) — одна из наиболее значимых культур, возделываемых в тропических и субтропических зонах. На засушливую провинцию Белуджистан (Balochistan) в Пенджабе (Punjab) — сельскохозяйственный центр Пакистана приходится более 70 % национального сбора арахиса. Для обеспечения высокой урожайности и в связи с проблемой устойчивости к болезням, засухе, окислительному стрессу рассматривается применение ростостимулирующих бактерий PGPR (plant growth promoting rhizobacteria). В летний сезон 2022 года на кафедре агрономии Ласбелааского университета сельского хозяйства, водных и морских наук был проведен вегетационный опыт для определения влияния PGPR (plant growth promoting rhizobacteria) на признаки, характеризующие рост, развитие и урожайность растений арахиса *Arachis hypogaea* L. (*Fabaceae*) в условиях сухих тропиков Пакистана. Контролем служили не обработанные PGPR растения V₁ (сорт BARI-11), V₂ (сорт FAKHARE CHAKWAL), V₃ (сорт BARD-479) и V₄ (сорт PSIH DWAR). Те же четыре сорта были обработаны PGPR: V₅ (BARI-11), V₆ (FAKHARE CHAKWAL), V₇ (BARD-479) и V₈ (PSIHDWAR). В эксперименте использовали 24 16-литровые емкости из ПВХ с внутренним диаметром 0,3 м. Песчано-суглинистая почва была собрана в поле, каждый вегетационный сосуд был заполнен на ²/₃ (15 кг почвы) с внесением рекомендованной дозы удобрений. Полив осуществляли умеренным количеством воды, семена арахиса высаживали в соответствии с вариантами опыта. По результатам эксперимента среди вариантов без обработки максимальные показатели всхожести, урожайности сухой биомассы и сухих стручков, массы 10 семян, числа семян в стручках, индекса длины корней, числа суток до созревания семян и числа стручков на растение были зафиксированы в варианте V₄ (PSIH DWAR), в варианте V₁ (BARI-11) отмечали минимальное число ветвей на растение, число клубеньков на растение, минимальные значения оборочного индекса и индекса высоты растения в период созревания. При обработке PGSR сорта дали лучшие результаты. При этом максимальную всхожесть семян, максимальные показатели по числу ветвей на растение, числу клубеньков на растение, урожайности сухой биомассы, массе 10 семян, числу семян в стручках, урожайности, высоте растения в период созревания, длине корней и числу суток до созревания выявили в варианте V₆ (сорт FAKHARE CHAKWAL). Минимальное число стручков на растение было отмечено при обработке сорта BARI-11 (V₅). Значительные эффекты от взаимодействия с PGPR наблюдались для всхожести — при сопоставлении V₁—V₆, для числа ветвей на растение — в паре V₁—V₆, для числа клубеньков на растение — в V₁—V₆, для урожая сухой биомассы — в V₄—V₈, для урожая сухих стручков — в V₄—V₅, для массы 10 семян — в V₂—V₅, для числа семян в стручках — в V₄—V₆, для высоты растения в фазу спелости — в V₁—V₅, для длины корня — в V₃—V₆, для числа стручков на растении — в V₄—V₅. Применение PGPR существенно повлияло на все сорта арахиса, особенно в отношении морфологических признаков. максимальную урожайность семян показали сорт FAKHARE CHAKWAL при обработке PGPR (V₆) и сорт PSIHDWAR без обработки (V₄). Предполагается, что эти два сорта подходят для выращивания арахиса в условиях сухого тропического климата Ласбелы (Пакистан).

Ключевые слова: арахис, ризобактерии, количественные и качественные характеристики.

Арахис (*Arachis hypogaea* L.) — одна из наиболее значимых сельскохозяйственных культур, возделываемых в тропических и субтропических климатических зонах. Арахис относится к семейству Бобовые (*Fabaceae*). Он происходит из Южной Америки, но в настоящее время выращивается по всему миру в тропических, субтропических и умеренных зонах, включая Африку, Азию и Северную Америку. Арахис, также известный как земляной орех, или арахис культурный (местное название — moong phalli), служит важной масличной культурой в системах богарного земледелия. Выращивается преимущественно в тропических и субтропических регионах Юго-Восточной Азии и Западной Африки. Под эту культуру в мире отведено около

24 млн га, ежегодно производится примерно 31 млн т продукции. Арахис обладает высокой питательной ценностью благодаря высокому содержанию белка, масла, жирных кислот, углеводов, витаминов и минералов. Семена арахиса служат отличным источником минералов, белка, углеводов и масла (соответственно 35-56 %, 25-30 %, 9,5-19 % и 35-56 %) (1).

На Азию (58,3 %) и Африку (31,6 %) приходится около 90 % мирового производства арахиса. Китай (16,6 млн т), Индия (6,6 млн т) и Нигерия (3,4 млн т) — три крупнейших производителя (2). Арахис занимает важное место в сельскохозяйственном производстве Пакистана. По оценкам, ежегодный объем производства составляет 1,2 млн т, что ставит страну на пятое место в мире (3). Эта универсальная культура играет решающую роль в обеспечении продовольственной безопасности и средств к существованию фермеров. На истории арахисоводства в Пакистане оказали влияние климатические особенности в разных регионах страны. Засушливая провинция Белуджистан (Balochistan). Пенджаб (Punjab) — сельскохозяйственный центр Пакистана, выступает в качестве лидера, обеспечивая более 70 % национального сбора арахиса (4).

Несмотря на наличие подходящих агроклиматических условий, развитие арахисоводства в Белуджистане сталкивается с рядом препятствий. Ограниченный доступ к улучшенным сортам и качественным семенам остается основной проблемой. Фермеры Белуджистана часто полагаются на местные сорта, которые, хотя и выносливы, дают меньшие урожаи и более восприимчивы к болезням (5). Внедрение современных методов ведения сельского хозяйства, включая улучшенные агрономические практики и эффективные стратегии борьбы с вредителями, может в перспективе раскрыть потенциал этой культуры (3). Полезные почвенные ризобактерии PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria) колонизируют корни и стимулируют рост растений. Симбиотическая и ассоциативная фиксация азота, а также растворение и минерализация других питательных веществ — это процессы, опосредованные PGPR, которые стимулируют развитие сельскохозяйственных культур. Производство гормонов, таких как гиббереллиновая кислота, ауксин, индолуксусная кислота, абсцизовая кислота, цитокинины и АЦК-дезаминаза, позволяет снизить количество этилена в корнях растений и, следовательно, увеличить их длину и плотность. Некоторые организмы вырабатывают водорастворимые витамины (ниацин, тиамин, рибофлавин, биотин и пантотеновая кислота), а также антагонистические сидерофоры (β -1,3-глюканаза, хитиназы, антибиотики, флуоресцентные пигменты и цианид) для борьбы с патогенами, что повышает устойчивость к засухе и окислительному стрессу (7).

В условиях дефицита питательных веществ PGPR могут играть решающую роль в содействии укоренному развитию растений. Их применение в сельском хозяйстве может способствовать сокращению использования агрохимикатов и стимулировать рост экологически чистых культур. В экспериментах с фосфатмобилизующими и азотфиксирующими микроорганизмами, ассоциированными с ризосферой, было показано увеличение урожайности у хвойных видов, риса, пшеницы, сахарного тростника, кукурузы и сахарной свеклы. Виды *Rhizobium* могут заменить химические азотные удобрения посредством биологической фиксации азота, но только при благоприятных условиях для азотфиксирующей активности и передачи азота растениям (8).

Развитие арахиса ускоряется при использовании PGPR на стадии семян. Рост, биомасса и урожайность повышаются благодаря усиленному образованию клубеньков у бобовых, улучшенному росту корней (длина и

ветвление) и лучшему развитию надземной части (высота и ветвление побегов) в результате более эффективной фиксации углерода. Использование полезных бактерий, таких как PGPR, для увеличения урожайности и плодородия почвы привлекает внимание специалистов во всем мире как один из подходов при формировании устойчивого сельскохозяйственного производства (9). PGPR обладают потенциалом для снижения глобальной зависимости от опасных агрохимикатов, которые наносят ущерб агроэкосистемам.

Настоящее исследование выполнено с учетом современных представлений о ризосфере и PGPR. Недавние исследования позволили получить детальное представление о многих опосредованных PGPR процессах. Для детальной оценки эффектов и возможностей применения PGPR в различных агроэкосистемах необходимо сравнение роста, развития и урожайности необработанных и обработанных растений.

Целью работы было определение эффективности роста различных сортов арахиса в условиях сухого тропического климата и оценка влияния PGPR на элементы структуры урожая.

Методика. Побережье Белуджистана (Пакистан) разделено на два округа — Ласбела (Lasbela) и Гвадар (Gwadar) и расположено в крайне засушливой тропической зоне. Для определения влияния ризобактерий, стимулирующих рост растений, на различные характеристики растений арахиса был проведен вегетационный опыт (Lasbela University of Agriculture Water and Marine Sciences, Uthal, Pakistan) (25.8270°N, 66.6236°E). Опыты проводили летом 2022 года в условиях теплицы.

В регионе преобладают условия сухих тропиков. Май, июнь и июль считаются жаркими месяцами, средняя максимальная температура достигает 49 °С, минимальная — 26 °С. Самый жаркий месяц года — июнь. Прохладный сезон длится с декабря по февраль, с обычно высокой температурой (до 26 °С). Январь считается самым холодным месяцем в Утхале, температура опускается до 11,11 °С при возможном максимальном значении 26,6 °С. Небольшое количество осадков обычно выпадает с июня по сентябрь. Август — благоприятный месяц с большим количеством осадков. Бездождливый период длится 9 мес, с сентября по июнь. В Утхале наблюдаются значительные сезонные колебания влажности. Период с апреля по октябрь наименее комфортный, с влажностью не менее 25 %. В Утале в июле все 31 сут бывают душными или очень душными. Направление ветра в регионе довольно изменчиво в течение года. Наиболее часто ветер дует с запада в течение 8-9 мес (с февраля по ноябрь, в августе на это направление приходится 61 %). Направление ветра с севера сохраняется в течение 3 мес, то есть с ноября по февраль, с пиковым значением 38 % в январе.

Перед посевом и после сбора урожая арахиса из вегетационных сосудов отбирали образцы почвы. Анализировали содержание в них питательных веществ. Вегетационные опыты в теплице были заложены по схеме полного рандомизированного дизайна (complete randomized design, CRD) в трех повторностях. Контролем служили варианты без обработки: V₁ — сорт BARI-11, V₂ — FAKHARE CHAKWAL, V₃ — BARD-479 и V₄ — PSIH-DWAR. Те же четыре сорта были обработаны PGPR: варианты V₅ (BARI-11), V₆ (FAKHARE CHAKWAL), V₇ (BARD-479) и V₈ (PSIH DWAR).

В эксперименте использовали штамм *Rahnella aquatilis* MR-8 (Biozote-Max, «Parc Agrotech Company (pvt.) Ltd.», Narc Islamabad). Штаммы *Rahnella* широко распространены и адаптированы к различным экологическим средам, что может быть связано с их устойчивостью к кислотам, солям, селену, антибиотикам и тяжелым металлам. Этот вид наиболее часто упоминается в связи с растениями, очень близок к нему *R. aceris* (10).

Около 20 г сахара растворяли в 20 мл воды. К водному раствору добавляли 70 мл PGRP. Раствором обрабатывали семена. Примерно через 3 ч семена высевали в вегетационные сосуды.

Семена арахиса были получены из Национального совета по сельскохозяйственным исследованиям (National Agricultural Research Council, NARC, Исламабад, Пакистан) и Института сельскохозяйственных исследований Барани (Barani Agriculture Research Institute, Чаквал, Пакистан). Посев проводили вручную в летний сезон 2022 года. Перед посевом субстраты готовили стандартным способом. Использовали 24 вегетационных сосуда из ПВХ с внутренним диаметром 0,3 м, высотой 0,4 м и объемом 16 л. Песчано-суглинистую почву отбирали в поле. Каждый горшок заполняли на $\frac{2}{3}$ из расчета 15 кг почвы на горшок, а также добавляли рекомендуемую норму удобрений («Fauji Fertilizer Company, Ltd.», Пакистан) (18). Полив осуществляли отмеренным объемом воды. Обработанные семена арахиса были высажены в соответствии с вариантами опыта при достижении почвой полной полевой влагоемкости. В каждый сосуд высаживали по 2 семени. Арахису требуется рыхлая песчано-суглинистая почва для облегчения прорастания в грунт.

Для образования корневых клубеньков и формирования семян арахису требуется меньше азотных, но больше фосфатных удобрений (21). Соотношение NPK должно быть 1:4:2 (19). Рекомендуемая доза NPK-удобрений при посеве составляет 20:80:40 кг/га. При выращивании арахиса в горшках необходим предпосевной полив. После посева первый полив проводили через 2 нед. Сорняки удаляли вручную. Посевы арахиса могут поражать термиты, цикадки и белокрылка. Также могут проявляться такие заболевания, как пятнистость и гниль семян. Для борьбы с ними применялись соответствующие фитосанитарные меры. Уборку урожая проводили при достижении полной зрелости, когда бобы внутри стручка полностью сформировались. Цвет стручка менялся с темно-коричневого на коричневый, а на 75 % семенной кожуры появлялись розовый или коричневый оттенки.

Регистрировали следующие показатели роста и урожайности: всхожесть (%), число ветвей на растение, число клубеньков на растение, число семян в стручках растения, урожайность сухих стручков (кг/га), масса 10 семян (г), урожайность сухой биомассы (кг/га), уборочный индекс (%), число стручков на растение, число суток до созревания, высота растения в фазу спелости (см), длина корня (см); данные по содержанию белка (%) и содержанию масла (%) в настоящей работе не представлены.

Собранные данные были статистически проанализированы с использованием дисперсионного анализа Фишера (ANOVA). Для вычислений использовали программу Statistix 9.0 (<https://www.statistix.com/>). При проверке различий между средними значениями вариантов использовали критерий наименьшей существенной разницы (least significant difference, LSD) на 5 % уровне значимости (11).

Результаты. В с х о ж е с т ь. Показатель всхожести имеет решающее значение для любой культуры, поскольку используется для достижения оптимальной нормы посева и густоты стояния растений в поле. Прорастание семян — это образование зародышевого побега, который впоследствии превращается в проросток. В нашем опыте были обнаружены высокодостоверные различия в показателе всхожести между необработанными и обработанными растениями арахиса (табл. 1).

Среди необработанных сортов арахиса максимальная всхожесть (%) была отмечена в V₄ (PSIH DWAR), за которым следовали V₁ (BARI-11) и

V₂ (FAKHARE CHAKWALL). Минимальные значения показателя были зафиксированы в V₃ (BARD-479) (см. табл. 1). Ризобактерии, стимулирующие рост растений, влияли на всхожесть обработанных сортов арахиса. Максимальный показатель наблюдался в V₆ (FAKHARE CHAKWALL), самая низкая всхожесть была зафиксирована в V₇ (BARD-479). При сопоставлении всхожести у каждого необработанного сорта с показателем у каждого обработанного расчеты показали, что максимальный эффект обработки проявился в парах V₁—V₆, V₁—V₇, V₃—V₆ и V₄—V₆, минимальный — в V₃—V₅.

1. Ростовые характеристики разных сортов арахиса *Arachis hypogaea* L. при инокуляции семян PGPR *Rahnella aquatilis* MR-8 (N = 3, n = 2, Lasbela University of Agriculture Water and Marine Sciences, Утхал, Пакистан, 2022 год)

Вариант	Всхо- жесть, %	Число ветвей на растение, шт.	Число клу- беньков на растение, шт.	Выход сухой биомассы, г	Выход сухих стручков, г	Масса 10 се- мян, г
Без обработки (A)						
V ₁	91,58 ab	8,00 a	290,67 a	55,92 ab	17,00 ab	8,00 ab
V ₂	85,83 ab	7,16 b	244,42 b	39,00 b	10,67 b	5,00 b
V ₃	84,50 b	7,25 ab	255,75 ab	53,00 ab	15,75 ab	8,67 ab
V ₄	95,25 a	7,50 a	273,50 ab	70,50 a	22,17a	11,92 a
LSD ₀₅	0,41	0,27	2,57	0,46	0,32	0,54
Обработка PGPR (B)						
V ₅	61,25 b	4,83 b	142,25 b	49,08 b	15,50 b	9,42 a
V ₆	99,17 a	8,67 a	315,42 a	52,25 ab	16,75 a	8,33 a
V ₇	98,75 a	8,42 a	305,00 a	51,42 ab	16,75 a	8,42 ab
V ₈	98,00 ab	8,00 a	301,67 a	65,67 a	16,58 ab	6,92 b
LSD ₀₅	0,52	0,23	2,65	0,49	0,36	0,32
Сопоставление A—B						
V ₁ —V ₅	66,67 bc	6,00 bcd	179,33 b	49,33 b	17,33 ab	11,00 ab
V ₁ —V ₆	100,00 a	9,00 a	340,00 a	51,00 b	18,00 ab	7,66 ab
V ₁ —V ₇	100,00 a	8,66 a	326,67 a	51,66 ab	16,33 ab	7,00 ab
V ₁ —V ₈	99,67 a	8,33 a	316,67 a	71,66 a	16,33 ab	6,33 ab
V ₂ —V ₅	50,00 c	4,00 d	106,67 b	34,33 b	06,33 b	2,66 b
V ₂ —V ₆	96,67 a	8,66 a	304,33 a	37,33 b	11,66 ab	5,66 ab
V ₂ —V ₇	98,33 a	8,33 ab	290,00 a	37,00 b	12,66 ab	5,33 ab
V ₂ —V ₈	98,33 a	7,66 abc	276,67 a	47,33 a	12,00 ab	6,33 ab
V ₃ —V ₅	41,67 c	3,66 d	106,67 b	50,00 b	16,00 ab	9,66 ab
V ₃ —V ₆	100,0 a	8,66 a	313,00 a	55,00 ab	15,00 ab	10,00 ab
V ₃ —V ₇	98,33 a	8,33 ab	300,00 a	52,66 ab	16,00 ab	8,33 ab
V ₃ —V ₈	98,00 a	8,33 ab	303,33 a	54,33 ab	16,00 ab	6,66 ab
V ₄ —V ₅	86,67 ab	5,66 cd	176,33 b	62,66 ab	22,33 a	14,33 ab
V ₄ —V ₆	100,00 a	8,33 ab	304,33 a	65,66 ab	22,33 a	12,00 ab
V ₄ —V ₇	98,33 a	8,33 ab	303,33 a	64,33 ab	22,00 a	13,00 a
V ₄ —V ₈	96,00 a	7,66 abc	310,00 a	89,33 a	22,00 a	8,33 b
LSD ₀₅	0,61	0,31	2,71	0,51	0,40	0,29

Примечание. V₁ и V₅ — BARI-11, V₂ и V₆ — FAKHARE CHAKWAL, V₃ и V₇ — BARD-479, V₄ и V₈ — PSIH DWAR. Любые два значения, не отмеченные одной и той же буквой, существенно различаются на уровне значимости 5 %.

Число ветвей на растение. Ветви обеспечивают структурную поддержку листьев, плодов и цветов. Через них корни транспортируют воду из почвы к листьям, а питательные вещества попадают от листьев к остальным частям растения. Дисперсионный анализ (см. табл. 1) показал высокосущественные различия для изученных вариантов. Также был зафиксирован значимый эффект от взаимодействия с PGPR для разных сортов. На основании значимых различий с необработанными сортами было установлено, что ризобактерии влияют на число ветвей на растение.

Максимальное число ветвей было в V₁ (BARI 11), за которым следовали V₄ (PSIH DWAR) и V₃ (BADC-479) Минимальное число ветвей среди необработанных сортов было зарегистрировано в V₂ (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 1).

PGPR влияли на число ветвей у обработанных сортов арахиса: максимальное число ветвей наблюдалось у сорта V₆ (FAKHARE CHAKWAL). Минимальный показатель был зафиксирован для V₅ (BARI-1). Для числа

ветвей на растение максимальный эффект от взаимодействия отмечали при сопоставлении V₁—V₆, минимальный — в V₃—V₅.

Число клубеньков на растение. Многие клубеньки на растениях арахиса содержат симбиотические ризобии, которые фиксируют молекулы атмосферного азота, позволяя растению развиваться и конкурировать с другими растениями. Фиксированный азот высвобождается, становясь доступным для питания почвы. Число клубеньков на растении у необработанных и обработанных растений арахиса значительно различалось (см. табл. 1). Значимые различия с необработанными сортами указывали на влияние PGPR на число клубеньков на растение.

Максимальное число клубеньков на растение у необработанных сортов было обнаружено в V₁ (BARI-11), за которым следовали V₄ (PSIH DWAR) и V₃ (BADC-479). Минимальное значение показателя было установлено в V₂ (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 1). Ризобактерии, стимулирующие рост растений, влияли на число клубеньков. У обработанного сорта FAKHARE CHAKWAL (V₆) было отмечено максимальное число клубеньков, минимальное число — в варианте V₅ (BARI-11). Максимальный эффект отмечали при сопоставлении V₁—V₆, минимальный — в V₂—V₅ и V₃—V₅.

Урожайность сухой биомассы. Считается, что генотипы с большей высотой, как правило, обладают большей урожайностью сухой биомассы, что также предпочитается местными фермерами, которые хотят получать арахис с высоким выходом соломы (местное название *Bhoosa*) для кормления скота. Данные нашего опыта указывают на влияние PGPR на выход сухой биомассы (см. табл. 1). Наибольшую урожайность сухой биомассы без обработки отмечали в V₄ (PSIH DWAR), за которым следовали V₃ (BADC-479) и V₁ (BARI-11). Минимальный выход сухой биомассы был отмечен в V₂ (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 1). Максимальный выход сухой биомассы наблюдался в V₈ (PSIH DWAR) по сравнению с другими сортами, минимальный — в V₅ (BARI-11). Максимальный эффект от PGPR для выхода сухой биомассы наблюдали при сопоставлении V₄—V₈, минимальный — в V₂—V₅.

Урожайность сухих стручков. Урожайность сухих стручков служит наиболее важным признаком и ключевым компонентом урожайности, который побуждает фермеров выращивать арахис в больших масштабах. Статистически значимые различия в урожайности сухих стручков отмечали между сортами как без обработки, так и при применении PGPR. Также был обнаружен значительный эффект взаимодействия с PGPR в опыте (см. табл. 1). Наибольшая урожайность сухих стручков среди необработанных растений была отмечена в V₄ (PSIH DWAR), за которым следовали V₁ (BARI-11) и V₃ (BADC-479), наименьшие значения показателя наблюдались в V₂ (FAKHARE CHAKWAL). Среди обработанных сортов выделялись варианты V₆ (FAKHARE CHAKWAL) и V₇ (BARD-479). Минимальный результат по урожайности сухих стручков наблюдался в V₅ (BARI-11) (см. табл. 1). Максимальный эффект отмечали при сопоставлении вариантов V₄—V₅ и V₄—V₆, минимальный — в V₂—V₅.

Масса 10 семян. Одним из наиболее важных компонентов урожайности арахиса служит масса семян, которая обычно выражается как масса 10 семян (10-seed weight, 10 SW). Многочисленные исследования выявили корреляцию между массой/размером семян и их урожайностью. В таблице 1 показаны значительные различия как между необработанными сортами арахиса, так и между обработанными PGPR. Также отмечены значительные различия между необработанными и обработанными сортами.

Наибольшая масса 10 семян у необработанных сортов арахиса была зафиксирована в V4 (PSIH DWAR), за которым следовали V3 (BADC-479) и V1 (BARI-11), наименьшая — в V2 (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 1). У обработанных сортов наибольшее значение показателя было получено в V5 (BARI-11), наименьшее — в V7 (BARD-479).

Максимальный эффект от взаимодействия с PGPR наблюдали для V2—V5, минимальный — для V4—V5.

Число семян в стручках. Число семян в сформированных стручках — один из трех компонентов урожайности (наряду с числом стручков и массой семян) и важная цель в селекции арахиса. В таблице 2 показано, что были обнаружены высокосignимые различия по числу семян в стручках между необработанными и обработанными PGPR сортами. Также имели место значительные различия по числу семян в стручках среди обработанных PGPR сортов арахиса.

Максимальный показатель среди необработанных сортов наблюдался в V4 (PSIH DWAR), за которым следовали V1 (BARI-11) и V3 (BADC-479), минимальный — в V6 (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 2). Среди обработанных сортов арахиса максимальное число семян в стручках отмечали в V6 (FAKHARE CHAKWAL), минимальное — в V5 (BARI-11).

Максимальный значимый эффект был зафиксирован при сопоставлении V4—V6, минимальный — в V2—V6.

2. Показатели урожайности разных сортов арахиса (*Arachis hypogaea* L.) при инокуляции семян ризобактериями, стимулирующими рост растений (PGPR), *Rahnella aquatilis* MR-8 ($N = 3, n = 2$, Lasbela University of Agriculture Water and Marine Sciences, Утхал, Пакистан, 2022 год)

Вариант	Число семян в стручках, шт.	Уборочный индекс, %	Высота в фазу спелости, см	Длина корня, см	Время до созревания, сут	Число стручков на растение, шт.
Без обработки (A)						
V1	30,00 ab	37,30 a	40,92 a	17,00 ab	193,00 a	16,34 ab
V2	17,08 c	26,63 b	39,33 a	14,58 b	181,50 c	10,75 b
V3	24,33 bc	23,69 b	34,42 b	14,67 b	184,75 c	16,67 ab
V4	36,67 a	28,42 ab	37,66 ab	17,58 a	189,25 b	24,50 a
LSD ₀₅	0,19	0,17	0,23	0,16	2,01	0,31
Обработка PGPR (B)						
V5	21,91 b	18,87 b	35,75 ab	13,00 b	179,75 c	18,92 a
V6	30,00 a	33,94 a	40,34 a	17,41 a	183,00 b	15,92 b
V7	28,67 a	32,08 a	38,34 a	17,00 a	189,25 a	16,83 ab
V8	27,50 ab	31,17 a	37,92 a	16,50 a	198,00 a	17,58 a
LSD ₀₅	0,16	0,19	0,16	0,19	2,09	0,41
Сопоставление A—B						
V1—V5	34,66 a	24,22 bc	45,33 a	14,66 ab	194,00 a	21,33 ab
V1—V6	29,66 bc	42,66 a	26,67 c	17,66 ab	194,00 a	14,00 c
V1—V7	28,33 bc	42,00 a	39,33 abc	17,33 ab	190,00 ab	15,33 bc
V1—V8	27,33 bc	40,33 a	37,00 abc	18,66 a	194,00 a	14,66 c
V2—V5	6,33 d	8,27 c	42,00 a	12,33 bc	186,00 a	6,66 c
V2—V6	21,66 a	33,58 ab	42,66 a	15,00 ab	168,33 b	9,33 bc
V2—V7	21,00 a	33,33 ab	42,33 a	15,67 ab	194,00 ab	12,00 b
V2—V8	19,33 b	31,33 ab	41,00 a	15,33 ab	178,00 b	15,00 ab
V3—V5	25,00 a	19,23 bc	31,33 c	8,33 c	194,00 a	19,66 ab
V3—V6	24,33 b	25,87 abc	37,33 abc	19,00 a	176,33 b	17,00 ab
V3—V7	24,00 b	25,00 abc	36,66 bc	16,67 ab	179,00 ab	15,66 bc
V3—V8	24,00 b	24,66 abc	37,00 abc	14,67 ab	190,00 a	18,33 ab
V4—V5	21,66 d	23,70 ab	39,67 ab	16,66 ab	175,00 b	28,00 a
V4—V6	44,33 a	33,15 ab	39,33 ab	18,00 a	194,00 a	23,33 ab
V4—V7	41,33 ab	28,00 bc	35,00 bc	18,33 a	194,00 a	24,33 ab
V4—V8	39,33 bc	28,33 bc	36,67 bc	17,33 ab	194,00 a	22,33 ab
LSD ₀₅	0,21	0,23	0,23	0,13	1,98	0,39

Примечание. V1 и V5 — BARI-11, V2 и V6 — FAKHARE CHAKWAL, V3 и V7 — BARD-479, V4 и V8 — PSIH DWAR. Любые два значения, не отмеченные одной и той же буквой, существенно различаются на уровне значимости 5 %.

Уборочный индекс. Уборочный индекс — это доля урожая

стручков с единицы площади выращиваемой биомассы. Он представляет собой критически важный показатель, оказывающий прямое влияние на общий урожай арахиса. В таблице 2 показано, что индекс урожайности различался как среди необработанных, так и среди обработанных сортов, а также при сравнении показателя сорта в зависимости от обработки PGPR.

Максимальный уборочный индекс для необработанных сортов арахиса был в V₁ (BARI-11), за которым следовали V₄ (PSIH DWAR) и V₃ (FAKHARE CHAKWAL), минимальный — в V₃ (BADC-479) (см. табл. 2). Для обработанных сортов максимальное и минимальное значения показателя были установлены соответственно в V₆ (FAKHARE CHAKWAL) и V₅ (BARI-11).

Также были зафиксированы достоверные эффекты PGPR: максимальный — в V₁—V₆, минимальный — в V₂—V₅.

Высота растения в фазу спелости. Высота растения — один из наиболее важных морфологических факторов, определяющих восприимчивость генотипа к полеганию, низкорослые растения более восприимчивы к удобрениям, чем высокорослые (20). Высота растения в фазу спелости различалась у сортов как без обработки, так и при обработке, а также в зависимости от обработки сорта PGPR (см. табл. 2). В целом, ризобактерии влияли на анализируемый показатель.

Максимальную высоту растений в вариантах без обработки отмечали в V₁ (BARI-11), за которым следовали V₂ (FAKRE CHAKWAL) и V₄ (PSIH DWAR), минимальную — в V₃ (BADC-479). При обработке в V₆ (сорт FAKHARE CHAKWAL) наблюдалось максимальное среднее значение показателя, в V₅ (BARI-11) — минимальное (см. табл. 2).

Максимальный эффект от взаимодействия с PGPR наблюдался для V₁—V₅, минимальный — для V₂—V₆.

Длина корней. При большей глубине проникновения в почву корни способны лучше обеспечивать растение водой, а при большой общей длине корней улучшается поглощение питательных веществ. Потребление питательных веществ варьирует в зависимости от типа культуры и окружающей среды. Мы установили (см. табл. 2) высокодостоверные различия среди необработанных сортов, среди обработанных сортов, а также у сортов в зависимости от обработки PGPR.

Максимальную длину корней у растений без обработки отмечали в V₄ (PSIH DWAR), за которым следовали V₁ (BARI-11) и V₃ (BADC-479), минимальную — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 2). Среди обработанных сортов максимальное значение показателя было получено в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), минимальное — в V₅ (BARI-11).

Максимальный эффект зафиксировали при сопоставлении V₃—V₆, минимальный — для V₃—V₅.

Число суток до созревания. Этот параметр важен для определения того, сколько времени потребуется растению, чтобы вырасти и начать плодоносить. По этому показателю также отмечали различия среди необработанных и среди обработанных сортов, а также у сортов в зависимости от применения PGPR (см. табл. 2). В целом, ризобактерии влияли на сроки созревания у арахиса.

Максимальный показатель у необработанных растений отмечали в V₄ (PSIH DWAR) и V₁ (BARI-11), минимальный — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL) и V₃ (BADC-479). Среди обработанных сортов максимальное значение отмечали в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), V₇ (BARD-479) и V₈ (PSIH DWAR), минимальное — в V₅ (BARI-11) (см. табл. 2).

Максимальный эффект PGPR выявлен в V₁—V₅, V₁—V₆, V₁—V₇,

V₁—V₈, V₂—V₅, V₂—V₇, V₂—V₈, V₃—V₅, V₃—V₇, V₃—V₇, V₃—V₈, V₄—V₅, V₄—V₅, V₄—V₆, V₄—V₇ и V₄—V₈, минимальный — для V₂—V₆ и V₃—V₆.

Число стручков на растение. Стручки выполняют важную функцию, защищая развивающиеся семена от вредителей и болезней. Помимо защитной роли, фотосинтетически активная стенка стручка постав-ляет ассимилянты и питательные вещества для развития семян. Из таблицы 2 видно, что число стручков на растение значительно различалось как в каждой из групп растений (необработанные и обработанные), так и у сортов при применении PGPR.

Максимальный показатель у необработанных растений арахиса был обнаружен в V₄ (PSIH DWAR), за которым следовали V₃ (BADC-479) и V₁ (BARI-11), минимальный — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL). Для обработанных сортов максимальное и минимальное значения отмечали соответственно в V₅ (BARI-11) и V₆ (FAKHARE CHAKWAL) (см. табл. 2).

Максимальный эффект наблюдался при сопоставлении V₄—V₅, минимальный — для V₂—V₅.

Таким образом, анализ параметров роста и урожайности необработанных растений арахиса (см. табл. 1, 2) показал, что максимальная всхожесть наблюдалась в V₄ (PSIH DWAR), максимальное число ветвей на растение — в V₁ (BARI-11), число клубеньков на растение — в V₁ (BARI-11), максимальная урожайность сухой биомассы — в V₄ (PSIH DWAR), урожайность сухих стручков — в V₄ (PSIH DWAR), масса 10 семян — в V₄ (PSIH DWAR), максимальное число семян в стручках — в V₄ (PSIH DWAR), наибольший уборочный индекс — в V₁ (BARI-11), наибольшая высота растения в фазу спелости — в V₁ (BARI-11), длина корней — в V₄ (PSIH DWAR), продолжительность созревания — в V₄ (PSIH DWAR), максимальное число стручков на растение — в V₄ (PSIH DWAR). Минимальная всхожесть была зафиксирована в V₃ (BADC-479), наименьшее число ветвей на растение — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL), число клубеньков на растение — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL), наименьшая урожайность сухой биомассы — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL), урожайность сухих стручков — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL), минимальное число семян в стручках — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL), наименьший уборочный индекс — в V₃ (BADC-479), наименьшая высота растения — в V₃ (BADC-479), длина корней — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL), самый короткий срок созревания — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL) и минимальное число стручков на растение — в V₂ (FAKHARE CHAKWAL). Следовательно, изученные сорта исходно различались по ряду показателей роста и урожайности.

При обработке PGPR максимальная всхожесть была отмечена в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), наибольшее число ветвей на растение — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), число клубеньков на растение — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), максимальная урожайность сухой биомассы — в V₈ (PSIH DWAR), масса 10 семян — в V₅ (BARI-11), наибольшее число семян в стручках — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), наибольший уборочный индекс — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), наибольшая высота растения в фазу спелости — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), длина корней — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), время до созревания — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL), число стручков на растение — в V₅ (BARI-11). Минимальные показатели по всхожести были установлены в V₇ (BARD-479), по числу ветвей на растение — в V₅ (BARI-11), числу клубеньков на растение — в V₅ (BARI-11), урожайности сухой биомассы — у V₅ (BARI-11), урожайности сухих стручков — в V₅ (BARI-11), массе 10 семян — в V₇ (BARD-479), числу семян в стручках — в V₅ (BARI-11), по уборочному индексу — в V₅ (BARI-11), высоте растений — в V₅

(BARI-11), длине корней — в V₅ (BARI-11), времени до созревания — в V₅ (BARI-11) и числу стручков на растение — в V₆ (FAKHARE CHAKWAL). Следовательно, в целом отмечалось влияние PGPR на показатели роста и продуктивности растений арахиса. При этом проявилась сортовая специфичность реакции сортов на применение PGPR, а преимущества сортов по отдельным признакам, имевшие место до обработки PGPR, не всегда сохранялись после применения PGPR.

Максимальный эффект от взаимодействия с PGPR для всхожести наблюдали при сопоставлении V₁—V₆, для числа ветвей на растение — для V₁—V₆, числа клубеньков на растении — для V₁—V₆, урожайности сухой биомассы — для V₄—V₈, урожайности сухих стручков — для V₄—V₅, массы 10 семян — для V₂—V₅, числа семян в стручках — для V₄—V₆, высоты растений в фазу спелости — для V₁—V₅, длины корней — для V₃—V₆, числа стручков на растение — в V₄—V₅. Минимальный эффект для всхожести был зафиксирован при сопоставлении V₃—V₅, числа ветвей на растение — для V₃—V₅, числа клубеньков на растении — для V₂—V₅, урожайности сухой биомассы — для V₂—V₅, урожайности сухих стручков — для V₂—V₅, массы 10 семян — для V₄—V₅, числа семян в стручках — для V₂—V₆, высоты растения в фазу спелости — для V₂—V₆, длины корней — для V₃—V₅, числа стручков на растение — для V₂—V₅.

Эффективность изолятов PGPR в нашем эксперименте по повышению показателей роста и урожайности различных сортов арахиса значительно варьировала. При использовании PGPR улучшилось большинство исследованных параметров, включая всхожесть, число ветвей на растение, длина корней, число клубеньков на растении, урожайность сухой биомассы, масса 10 семян, число семян в стручках и уборочный индекс. Ризосфера растений представляет собой гибкую и динамичную экологическую среду с активным взаимодействием микроорганизмов и растений, которая помогает растениям извлекать жизненно важные микро- и макроэлементы из ограниченного запаса питательных веществ (12).

Спрос на химические удобрения стремительно растет в развивающихся странах, таких как Пакистан. Однако химические удобрения не только наносят вред почвенной микрофлоре и фауне, но и вызывают деградацию окружающей среды, загрязнение воды и проблемы со здоровьем, а также повышают производственные затраты. В результате существует острая необходимость в поиске альтернативы этим вредным веществам.

PGPR способствуют повышению урожайности и усвоению питательных веществ благодаря влиянию на один или несколько признаков, что проявляется в определенной среде взаимодействия растения и микроорганизма. Как сообщалось, PGPR воздействуют на рост, урожайность и усвоение питательных веществ посредством разнообразных механизмов (13).

Разнообразная группа бактерий, известных как PGPR, быстро колонизирует ризосферу и обеспечивает сельскохозяйственным растениям как прямую, так и косвенную защиту, улучшает состояние почвы (13). PGPR могут продуцировать сидерофоры с низкой молекулярной массой и высоким сродством к железу (14). Регуляторы роста растений и сидерофоры, продуцируемые PGPR, помогают растениям удовлетворять потребности в железе, запустив процесс растворения и хелатирования железа из органических или неорганических комплексов в почве (1, 4, 16). В полувлажных тропиках арахис служит важной продовольственной и масличной культурой, вносящей вклад в обеспечение продуктами питания и в доход семьи.

Следует отметить, что на одних сортах по ряду оцениваемых показателей имел место достоверный положительный эффект от применения

PGPR, на других не было значительных изменений или даже происходило некоторое снижение показателей. Также интересен тот факт, что сорт PSIH DWAR, который имел значимо более высокие показатели без обработки PGPR, существенно или в виде тенденции по многим признакам опережал лидера, реагирующего на обработку PGPR, — сорт FAKHARE CHAKWAL (V₆) и, соответственно, остальные изученные сорта. Следовательно, для разработки регламентов обработки PGPR требуется их оптимизация с учетом сортовых особенностей культуры, состава микробного препарата и условий его применения.

Итак, в вегетационном опыте ростостимулирующие ризобактерии из группы PGPR оказали значительное влияние на все изученные сорта арахиса, особенно в отношении морфологических признаков. Сорт FAKHARE CHAKWAL при инокуляции PGPR имел максимальную урожайность семян. Необработанный сорт арахиса PSIH DWAR также показал максимальную урожайность.

Lasbela University of Agriculture, Water and Marine Science,
Uthal, Lasbela, Pakistan,
e-mail: drwaseem.agronomy@gmail.com ✉

Поступила в редакцию
10 апреля 2025 года
Принята к публикации
7 июля 2025 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2026, V. 61, № 1, pp. 143-155

INFLUENCE OF PLANT GROWTH PROMOTING RHIZOBACTERIA (PGPR) ON DIFFERENT TRAITS OF GROUNDNUT (*Arachis hypogaea* L.) UNDER DRY TROPICAL ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF LASBELA, PAKISTAN

A. Karim, M. Waseem✉, Q. Sarfaraz, H.T. Abbas, W. Bashir, G. Khaliq, S.F. Pandrani, S. Anwar

Lasbela University of Agriculture, Water and Marine Science, Uthal, Lasbela, Pakistan, e-mail drwaseem.agronomy@gmail.com (✉ corresponding author)
ORCID:

Karim A. orcid.org/0009-0005-2782-5445
Waseem M. orcid.org/0009-0009-7637-8038
Sarfaraz Q. orcid.org/0000-0002-9613-2133
Abbas H.T. orcid.org/0009-0002-7369-718X

Bashir W. orcid.org/0009-0000-2271-9954
Khaliq G. orcid.org/0000-0002-8676-2190
Pandrani S.F. orcid.org/0009-0001-1572-9801
Anwar S. orcid.org/0009-0008-2275-7887

The authors declare no conflict of interests

Final revision received April 10, 2025

Accepted July 07, 2025

doi: 10.15389/agrobiology.2026.1.143eng

Abstract

A pot experiment was carried out during summer season 2022 at the Department of Agronomy to determine the influence of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on the different traits of groundnuts under dry tropical environmental conditions of Lasbela, Pakistan. Four groundnut varieties V₁ (BARI-11); V₂ (FAKHARE CHAKWAL); V₃ (BARD-479); V₄ (PSIHDWAR); were treated with PGPR and similar were also used as nontreated groundnut varieties. Twenty-four pots were used in the experiment, made from PVC material with 0.300m internal diameter and 16L capacity. Sandy loam soil was collected from the field and 2/3 of each pot was filled at 15 kg soil pot⁻¹ and added recommended rate of fertilizer. The pots were irrigated with measured quantities of water and groundnut seeds were planted as per treatment. The result indicated that maximum performance was recorded in non-treated groundnut variety (V₄: PSIH DWAR) for germinations %, dry biomass yield, dry pod yield, hundred seed weight, number of seeds in pods, root length index, number of days taken to maturity and number of pods plant⁻¹; while in (V₁: BARI 11) minimum growth and yield traits were recorded against number of branch plant⁻¹, number of nodule plant⁻¹, post-harvest index and plant height at maturity index. The maximum result groundnut variety (V₆ FAKHARE CHAKWAL) for germination (%), branch plant⁻¹, number of nodule plant⁻¹, dry biomass yield, 10 seed weight, number of seed pod, harvest index, plant height at maturity, root length and days to maturity, respectively, however, minimum result was recorded number of pods plant⁻¹ was noted in (V₅: BARI-11). Moreover,

the significant interactive effects for germination (%) of groundnut varieties stated that maximum interaction for germination (%) was observed in V₁–V₆, number of branch plant⁻¹ in V₁–V₆, number of nodule plant⁻¹ in V₁–V₆, dry biomass yield in V₄–V₈, dry pod yield in V₄–V₅, hundred seed weight in V₂–V₅, number of seed pod in V₄–V₆, plant height at maturity in V₁–V₅, root length in V₃–V₆ and number of pods plant⁻¹ interaction in V₄–V₅. The application of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) affected all varieties of groundnut significantly, especially in terms of morphological traits. Groundnut varieties (V₆; FAKHARE CHAKWAL) produced maximum seed yield when treated with PGPR, while non-treated varieties (V₄; PSIHDPWAR) also produced maximum yield. It is suggested these two varieties are suitable for groundnut cultivation under the prevailing dry tropical environmental conditions of Lasbela, Pakistan.

Keywords: groundnut, PGPR, quantitative and qualitative traits.

REFERENCES

- Gulluoglu L., Bakal H., Onat B., El Sabagh A., Arioglu H. Characterization of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seed oil and fatty acids composition under different growing season under Mediterranean environment. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 2016, 4(5S): 564-571 (doi: 10.18006/2016.4(5S).564.571).
- FAOSTAT, Statistical Database. Food and Agriculture Organization. 2017.
- Pakistan Agricultural Research Council. *Groundnut production technology in Pakistan*. PARC, 2022. Available: <http://www.parc.gov.pk/>. No date.
- Iqbal M.A., Hussain M., Ali S. Groundnut production and its constraints in Pakistan. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2022, 11(12): 141-147.
- Pakistan Agricultural Research Council. *Groundnut cultivation practices and varietal development in Pakistan*. PARC, 2020. Available: <http://www.parc.gov.pk/>. No date.
- International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. *Groundnut agronomy and crop improvement*. ICRISAT, 2020. Available: <https://www.icrisat.org>. No date.
- Pérez-Montaño F., Alías-Villegas C., Bellogín R.A., Del Cerro P., Espuny M.R., Jiménez-Guerrero I., Cubo T. Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. *Microbiological Research*, 2014, 169(5-6): 325-336 (doi: 10.1016/j.micres.2013.09.011).
- Hayat R., Ahmed I., Sheirdil R.A. An overview of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for sustainable agriculture. In: *Crop production for agricultural improvement*. M. Ashraf, M. Öztürk, M. Ahmad, A. Aksoy (eds.). Springer, Dordrecht, 2012: 557-579 (doi: 10.1007/978-94-007-4116-4_22).
- Glick B.R. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 2012(5): 963401 (doi: 10.6064/2012/963401).
- Lee S.D., Jeon D., Kim I.S., Choe H., Kim J.S. *Rahnella aceris* sp. nov., isolated from sap drawn from *Acer pictum*. *Archives of Microbiology*, 2020, 202, 2411-2417 (doi: 10.1007/s00203-020-01961-5).
- Steel R.G.D., Torrie J.H., Dicky D.A. *Principles and procedures of statistics, a biometrical approach*. NY, 1997: 352-358.
- Jeffries P., Gianinazzi S., Perotto S., Turnau K., Barea J.M. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Journal of Biology for Fertile Soils*, 2003, 37: 1-16 (doi: 10.1007/s00374-002-0546-5).
- Dey R., Pal K.K., Bhatt D.M., Chauhan S.M. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 2004, 159(4): 371-394 (doi: 10.1016/j.micres.2004.08.004).
- Sarwar S., Khaliq A., Yousra M., Sultan, T., Ahmad, N., Khan M.Z. Screening of siderophore-producing PGPRs isolated from groundnut (*Arachis hypogaea* L.) rhizosphere and their influence on iron release in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020, 51(12): 1680-1692 (doi: 10.1080/00103624.2020.1791159).
- Arora N.K., Tewari S., Singh R. Multifaceted plant-associated microbes and their mechanisms diminish the concept of direct and indirect PGPRs. In: *Plant microbe symbiosis fundamentals and advances*. N. Arora (ed.). Springer, New Delhi, 2013: 411-449 (doi: 10.1007/978-81-322-1287-4_16).
- Singh R., Pandey D.K., Kumar A. PGPR isolates from the rhizosphere of vegetable crop Momordica charantia: Characterization and application as biofertilizer. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2017, 6(3): 1789-1802 (doi: 10.20546/ijcmas.2017.603.205).
- Lugtenberg B., Kamilova F. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 2009, 63: 541-556 (doi: 10.1146/annurev.micro.62.081307.162918).
- Xie M. Quantitative estimation of the nutrient uptake requirements of peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Agronomy*, 2020, 10(1): 119 (doi: 10.3390/agronomy10010119).

19. Singh G.P., Singh P.L., Panwar A.S. Response of groundnut (*Arachis hypogaea*) to biofertilizer, organic and inorganic sources of nutrient in North East India. *Legume Research*, 2011, 34(3): 196-201.
20. Khan L., Rehman S., Shah Z., Farooq U., Fahad S., Ahmad W. Evaluation of groundnut advanced lines on the basis of morphometric characters. *International Journal of Advanced Technology and Social Sciences (IJATSS)*, 2024, 2(2): 131-138 (doi: 10.59890/ijatss.v2i2.1311).
21. Argaw A. Integrating inorganic NP application and *Bradyrhizobium* inoculation to minimize production cost of peanut (*Arachis hypogaea* L.) in eastern Ethiopia. *Agriculture & Food Security*, 2018, 7: Article 20 (doi: 10.1186/s40066-018-0169-1).