

УДК 579.841.11: 631.85: 631.454

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-3-11-16

**ФОСФАТСОЛЮБИЛИЗИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ РОДА *PSEUDOMONAS*
И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ ФОСФОРА**

© Е.В. Кузина, Г.Ф. Рафикова, Т.Ю. Коршунова

Фосфор является вторым по значимости после азота элементом для растений. Удобрения на его основе, применяемые для стимулирования урожайности, малодоступны для большинства сельскохозяйственных культур, что приводит к их накоплению в почве и загрязнению окружающей среды. Использование фосфатсолубилизирующих бактерий способствует увеличению количества поглощаемого растениями фосфора. В большинстве публикаций, описывающих данную группу бактерий, их эффективность оценивается только *in vitro* по зонам гало, образуемым на агаризованных средах с ортофосфатом кальция. Целью данного исследования было сравнение солубилизирующих свойств бактерий рода *Pseudomonas* на плотной питательной среде, а также в песке и почве. Было показано, что все изучаемые культуры микроорганизмов способны солубилизовать нерастворимый фосфат в среде Пиковской. Наиболее активными были штаммы *Pseudomonas laurentiana* АНТ 56 и *Pseudomonas* sp. ИБ 182, выделенные из активного ила биологических очистных сооружений и пахотной почвы соответственно. Опыты с интродукцией штаммов показали, что в песке количество мобильного фосфора за две недели выросло в 2.6–3.8 раза (в контроле – в 1.2 раза), при этом в опыте с почвой достоверное увеличение содержания подвижного фосфора по сравнению с контролем было зафиксировано только для штамма *P. laurentiana* АНТ 17 (на 29.1%). Предполагается, что высокая солубилизирующая активность штамма *P. laurentiana* АНТ 17 может быть обусловлена комплексным действием механизмов различной природы, в том числе связана с синтезом индолил-3-уксусной кислоты и экзополисахарида. Проведенные исследования позволяют считать данный бактериальный штамм перспективным объектом для создания на его основе биологического препарата сельскохозяйственного назначения.

Ключевые слова: *Pseudomonas*, фосфатмобилизующие бактерии, индекс солубилизации, подвижный фосфор, индолил-3-уксусная кислота.

Фосфор является одним из макроэлементов, необходимых растениям для полноценного развития. К сожалению, при попадании в почву большая часть фосфора, входящего в состав удобрений, переходит в нерастворимые соединения и, следовательно, не может быть использована растениями [1]. Это вынуждает фермеров вносить повышенные дозы фосфорных удобрений, что приводит к увеличению кислотности почвы и значительному уменьшению содержания гумуса [2], а также загрязнению окружающей среды тяжелыми металлами [3]. Т.е., с одной стороны, в мире наблюдается рост производства и использования фосфорных удобрений, который в скором времени будет лимитирован истощением природных запасов фосфатных руд. С другой

стороны, на сегодняшний день в сельскохозяйственных почвах накоплено такое количество фосфатов, что если осуществить их мобилизацию, этого хватило бы, чтобы поддерживать урожайность культурных растений в течение 100 лет [4].

Эффективным способом повышения доступности почвенного фосфора для сельскохозяйственных культур является применение фосфатсолубилизирующих микроорганизмов (PSM), которое может рассматриваться как экологически чистая альтернатива чрезмерному использованию химических удобрений на основе данного элемента. Процесс биосолубилизации фосфатов в почве происходит под воздействием синтезируемых микроорганизмами органических кислот, кроме того, не последнюю

КУЗИНА Елена Витальевна – к.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,
e-mail: misshalen@mail.ru

РАФИКОВА Гульназ Фаилевна – к.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,
e-mail: rgf07@mail.ru

КОРШУНОВА Татьяна Юрьевна – д.б.н., Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

роль в этом явлении играют неорганические кислоты и хелатирующие вещества [1]. Известно, что способностью к солюбилизации обладает широкий перечень микроорганизмов, относящихся к различным группам: бактерии, грибы, водоросли [5]. Целью данного исследования стала оценка эффективности применения PSM рода *Pseudomonas* для повышения биодоступности фосфора при их интродукции в различные виды грунта.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования служили штаммы бактерий рода *Pseudomonas* из коллекции Уфимского Института биологии УФИЦ РАН: *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* ИВ 51 (ВКМ В-3455D) (панее был идентифицирован как *P. aureofaciens* ИБ 51), *P. laurentiana* АНТ 17, *P. laurentiana* АНТ 56, *Pseudomonas* sp. ИБ 182, *P. koreensis* ИБ-4 (ВКМ В-2830D).

Гидролиз фосфатов *in vitro* изучали на среде Пиковской со свежесажженным ортофосфатом кальция [6]. Интенсивность мобилизации фосфатов оценивали на 10-е сут инкубации путем расчета индекса солюбилизации (SI) согласно [7]. Способность к синтезу экзополисахаридов (ЭПС) исследовали при культивировании штаммов на установке по выращиванию микроорганизмов на среде Федорова следующего состава (г/л): K_2HPO_4 – 0.3, $CaHPO_4$ – 0.2, $MgSO_4$ – 0.3, K_2SO_4 – 0.2, NaCl – 0.5, $FeCl_3$ – 0.01, $CaCO_3$ – 5.0, меласса – 60.0. Устойчивость бактерий к уксусно-кислому свинцу оценивали в жидкой культуре на среде (г/л): пептон ферментативный – 10; дрожжевой экстракт – 3; NaCl – 5; глюкоза – 1. Свинец в среду добавляли в виде водного раствора соли $Pb(CH_3COO)_2$.

Оценку влияния интродукции штаммов псевдомонад на содержание подвижных форм фосфора в грунте проводили в модельном эксперименте. В нестерильную почву (pH 7.2) и стерильный песок (pH 7.4) добавляли ортофосфат кальция (0.5 масс. %) и увлажняли до 60% от полной влагоемкости. Опытные варианты инокулировали жидкой культурой бактерий с титром $\sim 10^9$ КОЕ/мл из расчета $2-3 \times 10^6$ КОЕ/г субстрата. В сосуды с песком дополнительно вносили 100 мл 2%-го раствора сахарозы. Почва – чернозем сегрегационный, содержание гумуса (по Тюрину) – 4.2%, обеспеченность подвижными формами калия (по Чирикову) – 8.2 мг/100 г, содержание общего азота (по Кьельдалю) – 0.5%. После внесения $Ca_3(PO_4)_2$

начальное содержание подвижного фосфора (по Чирикову) в песке составило 9.2 мг/кг, в почве – 40.3 мг/кг. Количество повторностей равнялось четырем, продолжительность эксперимента составила восемь недель.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных программ MS Excel. В таблицах данные представлены как среднее \pm стандартная ошибка. Достоверность различий оценивали с помощью *t*-критерия Стьюдента.

Результаты и их обсуждение. Штаммы, задействованные в данном исследовании, были выделены из значительно отличающихся друг от друга источников: ИВ 51, ИБ 182, ИБ-4 – из образцов пахотных почв Республики Башкортостан [8], АНТ 17 и АНТ 56 – из активного ила биологических очистных сооружений ПАО «Орскнефтеоргсинтез» (Оренбургская область) и г. Стерлитамака (Республика Башкортостан) соответственно [9]. В целом принято считать, что чаще всего PSM встречаются в почвах сельскохозяйственного использования, гораздо реже описаны PSM, изолированные из водных микробных сообществ [10]. Согласно [7], эффективно растворяющими фосфатами среди изучаемых штаммов были признаны те, у которых SI был выше 4. Оказалось, что штаммы АНТ 17 и АНТ 56, являющиеся представителями биоценоза очистных сооружений, не уступали по своей фосфатмобилизующей активности почвенным изолятам ИВ 51, ИБ 182 и ИБ-4 и даже превосходили их (рис., табл. 1).



Рис. Зоны солюбилизации ортофосфата кальция бактериальными штаммами ИБ 182 и АНТ 56 на среде Пиковской через 10 сут после инкубации

Известно, что фосфатмобилизующая активность у бактерий часто связана со способностью синтезировать фитогормоны [11], поэтому положительный эффект, который PSM оказывают на растения, может быть обусловлен

не только увеличением доступности фосфора, но и влиянием ростстимулирующих веществ, продуцируемых микроорганизмами. Вместе с тем, существует мнение, что присутствие в среде индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) усиливает солубилизирующую активность бактерий. Это может быть связано с тем, что ИУК задействована в регуляции генов, отвечающих за продукцию карбоксилатов, увеличение концентрации которых приводит к снижению рН и, следовательно, ускоряет растворение фосфатов [12]. Ранее было установлено [8], что исследуемые штаммы PSM значительно различались по уровню накопления ИУК в культуральной жидкости (38–878 нг/мл), а у штамма ИБ 182 ауксины в культуральной жидкости не детектировались (табл. 1).

Тот факт, что процесс биосолубилизации фосфатов в жидкой культуре не всегда сопровождается понижением рН среды, служит доказательством существования других эффективных механизмов мобилизации почвенного фосфора, например, за счет синтеза микроорганизмами таких биологически активных веществ, как сидерофоры или ЭПС [14]. Выступая в качестве хелатирующих агентов, они образуют стабильные комплексы с алюминием, железом, кальцием, входящими в состав почвенных фосфатов, и таким образом, обеспечивают мобильность фосфора. Предыдущие исследования показали, что ни один из представленных штаммов не является продуцентом сидерофоров [8, 9], но установлено, что два изолята (АНТ 17 и ИБ-4) при определенных условиях могут выделять в среду полисахарид (табл. 1).

Всесторонне изучая PSM, ученые пришли к выводу, что некоторые из них могут быть использованы для биоремедиации загрязненных тяжелыми металлами почв. Так, Teng с

соавторами [15] выяснили, что резистентный к свинцу штамм *Leclercia adecarboxylata* L 1-5, индуцируя солубилизацию фосфатов, тем самым способствует иммобилизации токсичного металла с превращением его в гидроксипатит и пироморфит. Среди штаммов, описываемых в статье, наибольшую толерантность к свинцу показали ИВ 51 и АНТ 17 (табл. 1). Выявленная особенность указывает на то, что данные культуры микроорганизмов могут быть использованы в том числе на почвах, подвергавшихся длительному антропогенному загрязнению.

Мы разделяем мнение авторов [16], утверждающих, что, ориентируясь только на зоны гало, образуемые микроорганизмами на твердых питательных средах, содержащих нерастворимые соединения фосфора, нельзя судить о том, насколько эффективно будет происходить солубилизация фосфатов при проведении опытов в жидкой среде или в почве. Следует учитывать, что активность PSM-интродуцентов меняется в зависимости от природы и доступности источников углерода и азота, получаемых ими из внешней среды, от типа и свойств почв. Неоднократно отмечалось, что при проведении тестирования потенциальных PSM на растениях штаммы, зарекомендовавшие себя *in vitro* как фосфатмобилизующие, в большинстве случаев не оказывали заметного воздействия на питание растений, а наблюдаемое улучшение роста последних могло быть вызвано совершенно другими ростстимулирующими механизмами. Поскольку представленные в данной работе штаммы относятся к бактериям, стимулирующим рост растений (PGPB), для того чтобы исключить их взаимное влияние друг на друга, а также предотвратить поглощение высвобождаемого фосфора корнями, модельный эксперимент был поставлен без участия растений.

Т а б л и ц а 1

Характеристика штаммов бактерий рода *Pseudomonas*

Штамм	Индекс солубилизации $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	Индолил-3-уксусная кислота, нг/мл ¹	Синтез экзо-полисахаридов	Рост в присутствии Pb^{2+} , з/л
ИВ 51	3.0	878±83	–	2.5
АНТ 17	5.7	255±22	+	2.5
АНТ 56	6.3	38±3	–	2.0
ИБ 182	6.3	не обнаружено	–	2.0
ИБ-4	4.3	141±12	+ ²	2.0

Примечание. ¹ – данные по [8]; ² – данные по [13].

Влияние интродукции микроорганизмами на содержание подвижных форм фосфора в песчаном грунте

Вариант опыта	Содержание подвижного фосфора P ₂ O ₅ , мг/кг		
	2 недели	4 недели	8 недель
Контроль	10.90±0.81 ^a	12.21±1.15 ^a	12.86±0.93 ^a
ИБ 51	27.00±2.13 ^b	37.63±3.09 ^c	37.71±2.26 ^b
АНТ 17	26.28±1.25 ^b	37.94±2.91 ^c	37.88±2.01 ^b
АНТ 56	28.65±2.11 ^b	34.92±3.44 ^{bc}	35.29±2.23 ^b
ИБ 182	35.26±2.72 ^c	35.41±2.73 ^{bc}	35.51±2.23 ^b
ИБ-4	24.12±1.36 ^b	31.27±2.64 ^b	34.86±2.41 ^b

Примечание. Достоверно отличающиеся значения помечены разными буквами ($p \leq 0.05$, t – тест).

Влияние интродукции микроорганизмов на содержание подвижных форм фосфора в почве

Вариант опыта	Содержание подвижного фосфора P ₂ O ₅ , мг/кг		
	2 недели	4 недели	8 недель
Контроль	53.73±4.13 ^a	68.59±5.36 ^a	68.68±4.15 ^a
ИБ 51	46.92±2.89 ^a	73.68±6.33 ^a	78.52±6.38 ^b
АНТ 17	84.11±5.17 ^b	88.58±6.51 ^b	88.93±5.75 ^b
АНТ 56	49.13±3.08 ^a	73.27±5.38 ^a	73.01±4.97 ^{ab}
ИБ 182	46.07±3.56 ^a	70.98±5.14 ^a	70.34±4.44 ^{ab}
ИБ-4	48.51±2.74 ^a	69.51±5.22 ^a	69.86±3.83 ^a

Примечание. Достоверно отличающиеся значения помечены разными буквами ($p \leq 0.05$, t – тест).

Установлено, что все используемые штаммы микроорганизмов способствовали мобилизации фосфора. В песке в течение первых двух недель количество подвижного фосфора в вариантах с интродукцией бактерий было выше, чем в контроле в 2.2–3.2 раза (табл. 2). Спустя еще 14 сут его содержание под влиянием бактериализации продолжало увеличиваться, но интенсивность процесса заметно снизилась (более чем в 2 раза). Последующие анализы показали, что активная фаза высвобождения фосфора в песке не продолжалась более месяца после начала испытания. Возможно, это объясняется тем, что к этому времени численность интродуцированных микроорганизмов начала уменьшаться и, следовательно, проблема дефицита этого элемента в среде перестала быть актуальной. В целом можно отметить, что к концу эксперимента в песке все PSB показали приблизительно одинаковую эффективность фосфатмобилизации. По скорости солубилизации в течение первых двух недель опыта заметно выделялся изолят

ИБ 182, он превосходил другие штаммы в 1.2–1.5 раза, что согласуется с данными, полученными ранее на среде Пиковской (табл. 1).

В почве, аналогично эксперименту с песком, интенсивное высвобождение фосфора происходило в течение первого месяца, точнее в период от двух до четырех недель с начала опыта (табл. 3). В целом анализ полученных данных показал, что в песке под воздействием наиболее активных из исследуемых штаммов АНТ 17 и ИБ 182 количество мобильного фосфора за две недели выросло в 2.9 и 3.8 раза соответственно, в опыте с почвой за четыре недели – в 2.2 и 1.8 раза. Очевидно, на скорость биосолубилизации оказывало влияние исходное содержание доступного фосфора в субстрате: при интродукции в почву бактерии не испытывали острого дефицита данного макроэлемента, в то время как в варианте с песком им пришлось срочно запускать механизм по компенсации его недостатка.

Несмотря на то, что все исследуемые штаммы продемонстрировали высокую ско-

рость растворения $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ на плотной питательной среде и в модельном эксперименте со стерильным песком, в опыте с почвой достоверное увеличение содержания подвижного фосфора по сравнению с контролем было зафиксировано только для штамма АНТ 17. Есть основания предполагать, что фосфатсолубилизирующая активность, которую он показал при интродукции в почву, может быть обусловлена воздействием нескольких факторов, в том числе, его способностью к синтезу ЭПС и ИУК.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что о перспективности PSB можно судить только после исследования их активности в условиях максимально приближенных к естественным, а наибольшего потенциала следует ожидать от штаммов, которые могут использовать для растворения труднодоступных соединений фосфора механизмы различной природы. В целом проведенные исследования позволяют рассматривать штамм *Pseudomonas laurentiana* АНТ 17 в качестве перспективного биотехнологического объекта, сфера применения которого связана с экологически ориентированным сельским хозяйством.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А18-118022190100-9 с использованием оборудования ЦКП УФИЦ РАН «Агидель» (Уфа, Россия).

Литература

1. Alori E.T., Glick B.R., Babalola O.O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture // *Front. Microbiol.* 2017. V. 8(971). DOI: 10.3389/fmicb.2017.00971
2. Molina M., Aburto F., Calderon R., Cazanga M., Escudey M. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2009. V. 18(4). P. 497–511. DOI: 10.1080/15320380902962320
3. Шаповалова Н.Н., Менькина Е.А. Агрехимическое состояние и биологическая активность почвы в последствии длительного применения минеральных удобрений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018. № 5(73). С. 43–46. DOI: 10.25930/vaak-2r91
4. Walpole B.C., Yoon M.-H. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: A review // *African Journal of Microbiology Research*. 2012. V. 6(37). P. 6600–6605. DOI: 10.5897/AJMR12.889
5. Krishna G.K.S., Janardhan S. Role of PSM in improving the soil fertility // *Vigyan Varta*. 2021. V. 2(5). P. 12–15.
6. Пиковская Р.И. Мобилизация фосфатов в почве в связи с жизнедеятельностью некоторых ви-

дов микробов // *Микробиология*. 1948. Т. 17. P. 362–370.

7. Hara F.A. dos S., de Oliveira L.A de. Physiological and ecological characteristics of rhizobia isolates from acid soils of Iranduba, Amazonas // *Pesq. Agropec. Bras.* 2005. V. 40(7). P. 667–672.

8. Коршунова Т.Ю., Рафикова Г.Ф., Кузина Е.В., Четвериков С.П., Бакаева М.Д., Столярова Е.А., Четверикова Д.В., Логинов О.Н. Бактерии рода *Pseudomonas* для агротехнологии и природоохранной деятельности. М.: Наука. 2020. 247 с.

9. Рафикова Г.Ф., Кузина Е.В., Коршунова Т.Ю., Логинов О.Н. Новые штаммы бактерий *Pseudomonas laurentiana* – перспективные агенты для агроботехнологии // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология*. 2020. Т. 75(4). С. 244–250.

10. Paul D., Sinha S.N. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* KUPSB12 with antibacterial potential from river Ganga, India // *Annals of Agrarian Science*. 2017. V. 15(1). P. 130–136. DOI: 10.1016/j.aasci.2016.10.001

11. Ponmurugan P., Gopi C. *In vitro* production of growth regulators and phosphatase activity by phosphate solubilizing bacteria // *African Journal of Biotechnology*. 2006. V. 5(4). P. 348–350.

12. Anteneh A.A., Cawthray G.R., Zhou Y., Ryder M.H., Denton M.D. Ability to produce indole acetic acid is associated with improved phosphate solubilising activity of rhizobacteria // *Archives of Microbiology*. 2021. DOI: 10.1007/s00203-021-02364-w

13. Рафикова Г.Ф., Коршунова Т.Ю., Миннебаев Л.Ф., Четвериков С.П., Логинов О.Н. Новый штамм бактерий *Pseudomonas koreensis* ИБ-4 как перспективный агент биологического контроля фитопатогенов // *Микробиология*. 2016. Т. 85(3). С. 317–326. DOI: 10.7868/S0026365616030137

14. Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. // *SpringerPlus*. 2013. V. 2(1). P. 587. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587

15. Teng Z., Shao W., Zhang K., Huo Y., Li M. Characterization of phosphate solubilizing bacteria isolated from heavy metal contaminated soils and their potential for lead immobilization. // *Journal of Environmental Management*. 2019. V. 231. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.012

16. Bashan Y., Kamnev A.A., de-Bashan L.E. Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth: a proposal for an alternative procedure // *Biol Fertil Soils*. 2013. V. 49. P. 465–479. DOI: 10.1007/s00374-012-0737-7

References

1. Alori E.T., Glick B.R., Babalola O.O. Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture // *Front. Microbiol.* 2017. V. 8(971). DOI: 10.3389/fmicb.2017.00971
2. Molina M., Aburto F., Calderon R., Cazanga M., Escudey M. Trace element composition of selected fertilizers used in Chile: phosphorus fertilizers as a source of long-term soil contamination // *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2009. V. 18(4). P. 497–511. DOI: 10.1080/15320380902962320
3. Shapovalova N.N., Men'kina E.A. Agrohimicheskoe sostojanie i biologicheskaja aktivnost'

pochvy v posledejstvii dlitel'nogo primeneniya mineral'nyh udobrenij // Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018. № 5(73). S. 43–46. DOI: 10.25930/vaak-2r91

4. Walpola B.C., Yoon M.-H. Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: A review // African Journal of Microbiology Research. 2012. V. 6(37). P. 6600–6605. DOI: 10.5897/AJMR12.889

5. Krishna G.K.S., Janardhan S. Role of PSM in improving the soil fertility // Vigyan Varta. 2021. V. 2(5). P. 12–15.

6. Pikovskaja R.I. Mobilizacija fosfatov v pochve v svjazi s zhiznedjatel'nost'ju nekotoryh vidov mikrobov // Mikrobiologija. 1948. T. 17. P. 362–370.

7. Hara F.A. dos S., de Oliveira L.A de. Physiological and ecological characteristics of rhizobia isolates from acid soils of Iranduba, Amazonas // Pesq. Agropec. Bras. 2005. V. 40(7). P. 667–672.

8. Korshunova T.Ju., Rafikova G.F., Kuzina E.V., Chetverikov S.P., Bakaeva M.D., Stoljarova E.A., Chetverikova D.V., Loginov O.N. Bakterii roda *Pseudomonas* dlja agrobiotehnologii i prirodoohrannoj dejatel'nosti. M.: Izd-vo «Nauka». 2020. 247 c.

9. Rafikova G.F., Kuzina, E.V., Korshunova, T.Y., Loginov, O.N. New bacterial strains of *Pseudomonas laurentiana*: promising agents for agrobiotechnology // Moscow University Biological Sciences Bulletin. 2020. V. 75(4). P. 206–211. DOI: 10.3103/S0096392520040082

10. Paul D., Sinha S.N. Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacterium *Pseudomonas aeruginosa* KUPSB12 with antibacterial potential from river Ganga, India // Annals of Agrarian Science. 2017. V. 15(1). P. 130–136. DOI: 10.1016/j.aasci.2016.10.001

11. Ponnurugan P., Gopi C. *In vitro* production of growth regulators and phosphatase activity by phosphate solubilizing bacteria // African Journal of Biotechnology. 2006. V. 5(4). P. 348–350.

12. Anteneh A.A., Cawthray G.R., Zhou Y., Ryder M.H., Denton M.D. Ability to produce indole acetic acid is associated with improved phosphate solubilising activity of rhizobacteria // Archives of Microbiology. 2021. DOI: 10.1007/s00203-021-02364-w

13. Rafikova G.F., Korshunova T.Y., Minnebaev L.F., Chetverikov S.P., Loginov O.N. A new bacterial strain, *Pseudomonas koreensis* IB-4, as a promising agent for plant pathogen biological control // Microbiology. 2016. V. 85(3). P. 333–341. DOI: 10.1134/S0026261716030115

14. Sharma S.B., Sayyed R.Z., Trivedi M.H., Gobi T.A. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. // SpringerPlus. 2013. V. 2(1). P. 587. DOI: 10.1186/2193-1801-2-587

15. Teng Z., Shao W., Zhang K., Huo Y., Li M. Characterization of phosphate solubilizing bacteria isolated from heavy metal contaminated soils and their potential for lead immobilization. // Journal of Environmental Management. 2019. V. 231. P. 189–197. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.012

16. Bashan Y., Kamnev A.A., de-Bashan L.E. Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth: a proposal for an alternative procedure // Biol Fertil Soils. 2013. V. 49. P. 465–479. DOI: 10.1007/s00374-012-0737-7

PHOSPHAT SOLUBILIZING BACTERIA OF THE GENUS *PSEUDOMONAS* AND THE EFFICIENCY OF THEIR APPLICATION TO INCREASE THE AVAILABILITY OF PHOSPHORUS

© E.V. Kuzina, G.F. Rafikova, T.Yu. Korshunova

Ufa Institute of Biology – Separate Structural Subdivision of the Federal State Budgetary Scientific
Institution Ufa Federal Research Centre of the RAS,
69, prospect Oktyabrya, 450054, Ufa, Russian Federation

Phosphorus is the second most important element for plants after nitrogen. Fertilizers based on it, used to stimulate productivity, are inaccessible for most crops, which leads to their accumulation in the soil and environmental pollution. The use of phosphate-solubilizing bacteria increases the amount of phosphorus absorbed by plants. In most publications describing this group of bacteria, their effectiveness is assessed only *in vitro* by the halo zones formed on agar media with calcium orthophosphate. The aim of this study was to compare the solubilizing properties of bacteria of the genus *Pseudomonas* on a solid nutrient medium, as well as in sand and soil. It was shown that all studied cultures of microorganisms are capable of solubilizing insoluble phosphate in Pikovskaya's medium. The most active strains were *Pseudomonas laurentiana* ANT 56 and *Pseudomonas* sp. IB 182, isolated from the activated sludge of biological treatment facilities and arable soil, respectively. Experiments with the introduction of strains showed that the amount of mobile phosphorus in the sand increased 2.6–3.8 times in two weeks (in the control - 1.2 times), while in the experiment with soil, a significant increase in the content of mobile phosphorus compared to the control was recorded only for the strain *P. laurentiana* ANT 17 (by 29.1%). It is assumed that the high solubilizing activity of the *P. laurentiana* ANT 17 strain may be due to the complex action of mechanisms of different nature, including the synthesis of indolyl-3-acetic acid and exopolysaccharide. The studies carried out make it possible to consider this bacterial strain as a promising object for creating on its basis a biological preparation for agricultural purposes.

Key words: *Pseudomonas*, phosphatemobilizing bacteria, solubilization index, mobile phosphorus, indolyl-3-acetic acid.