

ЗЕМЛЕРОБСТВО, ГРУНТОЗНАВСТВО ТА АГРОХІМІЯ

УДК 631.95:502.174

ДЕТОКСИКАЦІЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЕНИХ ТЯЖЕЛИМИ МЕТАЛЛАМИ

Г. П. Хубаева, к.т.н., доцент СКГМИ (ГТУ), член – коресподент Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности

К. Е. Сокаев, д.с.-х.н., федеральное государственное бюджетное учреждение «Станция агрохимической службы Северо – Осетинская», член – коресподент Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ)

С. А. Бекузарова, д.с.-х.н., профессор, заслуженный изобретатель РФ

В статье приводятся результаты трехлетних исследований в микрополеводном опыте по изучению действия известки, навоза и местных цеолитоподобных глин-ирлитов на детоксикацию почв от тяжелых металлов и получения экологически чистой растениеводческой продукции при выращивании картофеля.

Ключевые слова: почва, тяжелые металлы, загрязнение, известка, навоз, ирлиты, клубни картофеля, ботва, детоксикация.

Постановка проблемы. Почвенный покров вместе с его микромиром выполняет функции универсального поглотителя, разрушителя и нейтрализатора различных загрязнений. Несмотря на протекторные свойства почвы, существуют пределы, превышение которых привело к необратимым процессам. Следовательно, особое значение имеет детоксикация, восстановление техногенно нарушенных земель, а также превентивные меры. Таким образом, все работы по детоксикации земель должны быть основаны на хорошо проработанных способах использования земель с учетом специальных видов природного и хозяйственного планирования, в том числе, почвенно-географического, геоботанического, земледельческого.

Агрохимическая служба РФ ежегодно обследует 25-28 млн. гектаров сельскохозяйственных угодий и ведет наблюдения за содержанием в почве агрохимических показателей, а также тяжелых металлов, остаточных количеств пестицидов, радионуклидов и накопила определенные данные по различным почвенно-климатическим зонам (М.Н. Овчаренко, 1994). Как пишет М.Н. Овчаренко (1994), практически во всех регионах отмечаются пахотные угодья с уровнем загрязнения почв тяжелыми металлами.

В большой степени почвы загрязнены вблизи городов, больших дорог: свинцом, цинком, медью, никелем, кобальтом. Обнаруживаются тяжелые металлы в растениеводческой продукции даже при относительно невысоких уровнях их содержания в почвах.

Поступающие в почвы тяжелые металлы подвергаются различным видам трансформации в зависимости от свойств почв и биологических особенностей растений. Основными факторами, влияющими на подвижность ТМ в почве, их трансформацию и доступность растениям, многие исследователи считают: растворимость солей тяжелых металлов, рН почвенной среды, содержание органического вещества в почве, грануло-

метрический состав и катионнообменная емкость, вид ТМ и уровень загрязнения ими почвы, видовые (биологические) особенности выращиваемых культур.

Для загрязненных тяжелыми металлами почв способы, снижающие их транслокацию в растения, основаны на переводе катионов тяжелых металлов в слабодоступные растениям формы или в подвижные соединения с последующим выщелачиванием. Но при переводе ТМ в подвижные соединения, прежде чем они будут выщелачиваться в нижележащие горизонты, растения могут успеть накопить их достаточно больших количествах. Наиболее распространены способы, базирующиеся на переводе катионов металлов в малоподвижные формы при использовании больших доз органических удобрений, известкования, фосфоритования и глинования, а также применения цеолитов.

Большую роль в миграции и сорбции тяжелых металлов играет органическое вещество почвы. Оно повышает поглотительную способность, буферность почвы, способствует снижению токсического действия ТМ, концентрации солей в почвенном растворе, уменьшению фитотоксичности многовалентных ТМ и препятствует их проникновению в растения. Продолжительное действие внесения высоких доз органических удобрений проявляется на легких почвах с малой поглотительной способностью. При рекультивации легких почв в качестве эффективного приема иногда применяют глинование, внесение глин, содержащих алюмосиликаты типа монтмориллонита. Этот прием является дорогостоящим, трудно выполнимым технологически. В последнее время распространено использование природных сорбентов, таких как цеолиты. Исследования А.И. Обухова (1990) показали, что наибольшее эффективность цеолиты проявляют насильно загрязненных почвах, снижая подвижность ТМ. Действия цеолита увеличивается при внесении навоза или различных нетрадиционных удобре-

ний.

Многие исследователи: М.М.Овчаренко и др. (1996,1998), Ш. А. Алиев (2001), И.А Шильников и др. (1996) и др., предлагают такой эффективный прием, снижающий подвижность ТМ, как известкование кислых почв. Но он носит зональный характер и не является продуктивным в отношении нейтральных и слабощелочных почв, поскольку на кислых почвах подвижность ТМ выше, что увеличивает поступление их в растения.

В то же время пока нет единого мнения по регулированию процесса трансформации ТМ в нужную сторону и оценки способов детоксикации почв и получения экологически чистой продукции. Надежных конкретных рекомендаций по снижению доступности ТМ из загрязненных почв в растения до настоящего времени разработано недостаточно.

Цель и методика исследований. Принимая во внимание все выше сказанное, мы на Станции агрохимической службы «Северо-Осетинская» в 2002-2004 гг. провели исследования с целью изучения транслокации тяжелых металлов в системе почва-растение и приемов их детоксикации в многофакторном микрополе опыте, который заложен на опытном поле Северо-Кавказского НИИГПСХ согласно Методическим указаниям ЦИНАО - ныне ВНИИА им. Д. Н. Прянишкова. В опытах изучали, на фоне минеральных удобрений выщелоченных черноземов, почвы, зараженные искусственно тяжелыми металлами.

Опыт закладывался в четырехкратной повторности в целлофановых сосудах без дна, размером 40*40*30 см, площадь поверхности сосуда – 0,16 м²

Для изучения основных вариантов опыта на одинаковом загрязненном фоне был создан такой фон искусственно путем внесения в почву солей ТМ: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; $\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ из расчета на чистый элемент Cu – 150, Zn – 300, Pb – 100, Cd – 5 и Ni – 100 мг/кг почвы.

Результаты и их обсуждения. Исследования показали, что в ходе вегетации картофеля происходили некоторые изменения в количественном выражении тяжелых металлов в почве. В таблице 1 приведены данные по содержанию тяжелых металлов в почве до закладки опыта (исходное содержание), после закладки опыта (внесения солей тяжелых металлов и посадки картофеля), в период цветения (наиболее ответственная фаза развития) и после уборки клубней. Из приведенных данных видно, что содержание ТМ в исходной почве незначительное. Внесение минеральных удобрений не оказало существенного влияния на количество металлов в почве.

Содержание ТМ в почве на контрольном и фоновом вариантах снижалось в период вегетации картофеля примерно одинаково.

Искусственно создаваемый в почве при закладке опыта загрязненный ТМ фон (Cu – 150, Zn – 300, Pb – 100, Cd – 5 и Ni – 100 мг/кг почвы в расчете на чистый металл) в течение вегетации картофеля претерпевал значительные изменения, заметно и постепенно снижаясь к концу вегетации картофеля по всем вариантам опыта, что по-видимому объясняется, с одной стороны, накоплением этих металлов в ботве и клубнях картофеля во время вегетации и, с другой стороны, вымыванием части их в нижележащие горизонты почвы.

Применение извести и навоза при раздельном их внесении не оказало существенного влияния на содержание Cu, Cd и Ni в почве по отношению к варианту Фон + ТМ, но они заметно снижали содержание Zn и Pb, особенно при совместном их внесении. Действие ирлитов 1 и 7 на снижение содержания ТМ было более заметным, особенно на вариантах с внесением ирлита 7. Видимо, очень сильная кислотность этого природного материала (рН = 3,8 и гидролитическая кислотность = 10,8 мг-экв/100г) более растворяюще действовала на металлы, чем способствовала более интенсивному их вымыванию из корнеобитаемого слоя почвы, что приводило к заметному снижению их содержания в пахотном слое почвы к фазе цветения и далее к уборке по сравнению с созданным загрязненным фоном при закладке опыта [8].

Изучение поведения ТМ в системе почва-растение, установление размеров поступления и выноса их с урожаями сельскохозяйственных культур имеет определяющее значение в деле разработки способов детоксикации почв и получения экологически чистой растениеводческой продукции.

Результаты исследований по изучению содержания тяжелых металлов в клубнях картофеля, приведены в таблице 1. Следует сказать о большом различии в накоплении ТМ в клубнях в разные годы и по вариантам опыта. Так, средневзвешенное содержание металлов на контроле варьировало по годам в пределах: Cu – 2,2-5,2, Zn – 1,8-5,2, Cd – 0,03-0,04, Pb – 0,1-3,5, Ni – 0,48-1,65 мг/кг.

Такой разброс в показателях частично объясняется сложившимися в годы исследований различными погодными условиями и, по-видимому, различием выбросов близлежащих металлургических предприятий при переработке в разные годы разнокачественной руды, которые выпадают на почву и растения.

Влияние агрохимикатов на содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля, мг/кг

Вариант	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni
1. Контроль	4,13	3,50	0,03	2,06	1,20
2. N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ –Фон	4,23	3,63	0,04	2,17	0,99
3. Фон +ТМ	5,93	5,27	0,06	4,03	2,52
4. Фон +ТМ+ известь	3,57	4,40	0,035	2,43	1,73
5. Фон + ТМ + навоз	3,70	4,57	0,045	3,03	1,79
6. Фон + ТМ + известь +навоз	3,23	3,67	0,035	1,77	1,56
7. Фон + ТМ + ирлит 1	3,95	4,30	0,02	1,70	2,14
8. Фон + ТМ + ирлит 7	4,40	4,20	0,03	2,80	2,43
9. Фон + ТМ + ирлиты 1+7	4,10	3,80	0,02	2,60	2,25
10. N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ +ТМ	5,83	5,63	0,065	4,07	3,63
ПДК	5	10	0,03	0,5	0,5

Максимальное накопление всех ТМ в клубнях картофеля во все годы исследований происходило в вариантах 3 и 10, то есть при внесении соответственно одинарной и двойной дозы минеральных удобрений и создании в почве под картофелем загрязненного тяжелыми металлами фона, из которого без применения мелиорантов растения поглощали значительно больше ТМ, чем на вариантах, где вносились мелиоранты. Причем значительное загрязнение продукции произошло Cu, Cd, Pb и Ni с превышением ПДК в 1,41-1,37, 1,99-2,16, 8,0-8,1 и 7,03-10,34 раза соответственно по элементам и вариантам. Такую загрязненную продукцию использовать в пищевых целях не рекомендуется. Загрязненные тяжелыми металлами клубни картофеля лучше использовать при соответствующей переработке для производства крахмала или спирта.

Внесение в почву агрохимикатов способствовало снижению поступления ТМ в растения картофеля. Лучшее действие в этом плане оказывало известкование. Так, внесение в почву известняковой муки в дозе 6 т/га значительно снижало содержание ТМ в клубнях картофеля во все годы исследований. Такое наше заключение по отношению роли известкования совпадает с мнением многих других авторов [7, 9], которые утверждают, что основным приемом снижения подвижности большинства ТМ в кислых почвах и их поступления в растения является известкование в результате комплексного воздействия на почву. С одной стороны, металлы в виде карбонатов и гидроксидов имеют низкую растворимость, с другой – известь на кислых почвах значительно увеличивает микробную массу, а микроорганизмы в свою очередь способны поглощать и удерживать многие металлы [6]. В результате этого несколько возрастает и емкость катионного поглощения почв, что тормозит поступление ТМ в растения.

Применение ирлитов оказывало положительное влияние на снижение содержания ТМ в клубнях картофеля, незначительно уступая извести и навозу, а в некоторых случаях даже превосходя их. В вариантах на опытах с клубнями кар-

тофеля с применением ирлитов было обнаружено меньше Cu и Zn, чем в вариантах с внесением извести и навоза. Большее влияние на снижение накопления ТМ растениями оказывал ирлит 1. Действие же ирлита 7 было слабее, видимо, в связи с очень высокой ее кислотностью, растворяющей действующей на кислоторастворимые формы металлов, что облегчает их поглощение и накопление растениями.

Между надземной частью и корневой системой растения происходит постоянный обмен веществ. Обе синтетические лаборатории – лист и корень – взаимно зависят от работы друг друга, используют «полуфабрикаты», образовавшиеся в каждом из них, для продолжения синтеза. Поэтому при определении содержания элементов питания, в том числе микроэлементов и тяжелых металлов в растении, важно знать в данном конкретном случае их содержание не только в товарной части урожая (клубнях), но также и его побочной продукции (ботве).

В связи с этим были выполнены лабораторные анализы по определению содержания тяжелых металлов в ботве картофеля в наиболее ответственную фазу (фаза цветения) в зависимости от антропогенной нагрузки и применения различных агрохимикатов и мелиорантов (табл. 2).

На вариантах опыта с внесением солей ТМ при создании загрязненного фона концентрация всех ТМ в ботве сильно увеличилась по сравнению с контролем и фоновым вариантом. При этом превышение средневзвешенного содержания составило по Cu – 6,3 раза, Zn – 2,5, Cd – 2,4, Pb – 1,4 и Ni – 2,3 раза по сравнению с удобрительным фоном (N₃₀P₃₀K₃₀).

Известкование почвы, применение навоза и ирлитов значительно снижали концентрацию ТМ в ботве. Более всего содержание ТМ снижало внесение в почву извести, на втором месте применение навоза как отдельно, так и при совместном внесении с известью. Применение ирлитов также было эффективным, однако несколько уступало действию извести и навоза.

Влияние агрохимикатов на содержание тяжелых металлов в ботве картофеля мг/кг

Вариант	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni
1. Контроль	5,83	13,46	0,06	7,43	3,73
2. N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ –Фон	6,40	18,23	0,09	8,33	3,96
3. Фон +ТМ	40,16	45,03	0,22	11,9	9,03
4. Фон +ТМ+ известь (6 т/га)	30,73	35,73	0,14	8,67	7,60
5. Фон + ТМ + навоз (20 т/га)	34,36	36,06	0,16	9,46	7,37
6. Фон + ТМ + известь +навоз	32,73	36,07	0,13	9,30	7,90
7. Фон + ТМ + ирлит 1(2 т/га)	44,60	49,40	0,20	9,30	8,95
8. Фон + ТМ + ирлит 7 (2 т/га)	44,60	53,75	0,18	9,50	12,55
9. Фон + ТМ + ирлиты 1+7 (1+1 т/га)	39,60	40,90	0,20	8,65	8,35
10. N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ +ТМ	40,26	46,50	0,24	12,23	9,43

Вынос ТМ с урожаем основной и побочной продукции сельскохозяйственных культур является важным показателем биологического круговорота их в окружающей среде. Величина выноса непостоянная и обуславливается почвенно-климатическими условиями, величиной урожайности, содержанием металлов в почве, их доступности растениям и т.д.

Проведенные расчеты по определению хозяйственного выноса ТМ с урожаем сельскохозяйственной продукции (клубни картофеля + ботва) представлены в таблице 3. Внесение N₃₀P₃₀K₃₀ (вариант 2) заметно увеличило хозяйственный вынос всех изучаемых металлов во все

годы исследований. В среднем за 3 года превышение выноса ТМ на этом варианте по сравнению с контролем составило: Cu – 0,05 кг/га, Zn – 0,12, Pb – 0,05 и Ni – 0,01 кг/га. На искусственно загрязненном фоне почвы (вариант 3) хозяйственный вынос значительно увеличился и в среднем за 3 года превысил фоновый вариант по меди в 4,1 раза, по цинку – 2,3 раза, по кадмию – 2,7 раза, по свинцу - 1,4 раза и по никелю – 3,0 раза. При этом доля ботвы в процентах от хозяйственного выноса составила по Cu – 86,0-87,9; Zn – 79,6-94,0; Cd – 80,0-85,7; Pb – 50,0-80,7 и Ni – 66,7-77,8%.

Таблица 3

Вынос тяжелых металлов из почвы с урожаем картофеля в зависимости от применения агрохимикатов

Вариант	Хозяйственный вынос, кг/га					Вынос с ботвой, % от хозяйственного выноса				
	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni
1. Контроль	0,10	0,16	0,001	0,10	0,04	58,9	78,3	72,3	83,0	65,9
2. N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀ –Фон	0,14	0,28	0,001	0,15	0,05	61,4	80,2	63,4	81,2	42,0
3. Фон +ТМ	0,58	0,61	0,005	0,23	0,12	87,3	87,4	82,8	69,3	73,2
4. Фон +ТМ+ известь	0,54	0,62	0,003	0,21	0,12	90,3	87,4	83,4	74,2	80,8
5. Фон + ТМ + навоз	0,73	0,78	0,005	0,27	0,14	90,9	88,4	84,5	75,0	80,7
6. Фон + ТМ +известь +навоз	0,73	0,80	0,004	0,26	0,16	91,7	89,7	84,1	87,1	82,7
7. Фон + ТМ + ирлит 1	0,72	0,73	0,003	0,17	0,15	92,4	93,9	90,9	75,0	81,2
8. Фон + ТМ + ирлит 7	0,67	0,79	0,003	0,19	0,18	91,1	92,6	88,2	62,4	83,1
9. Фон + ТМ + ирлиты 1+7	0,64	0,67	0,003	0,18	0,14	91,4	92,7	90,9	54,7	81,5
10. N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀ +ТМ	0,88	0,97	0,006	0,36	0,20	88,7	89,1	80,6	72,5	74,0

известкование почвы не оказало заметного влияния на вынос ТМ с урожаем основной и побочной продукции. Видимо, это связано с тем, что внесение извести в определенной степени способствует переводу солей ТМ в менее доступные для растений соединения, что ограничивает поглощение их растениями, в связи с чем концентрация металлов в растениях ниже, отсюда и вынос меньше. Однако внесение извести способствует заметному повышению урожайности как основной (клубни), так и побочной (ботва) продукции картофеля. По-видимому, такое двоякое действие извести в данном конкретном случае взаимно уравновешивалось и поэтому разница в выносе ТМ между вариантами Фон + ТМ и Фон + ТМ + известь, оказалась незначительной.

Применение навоза как отдельно, так и совместно с известью, способствовало повышению хозяйственного выноса ТМ во все годы исследо-

ваний, что связано со значительным повышением урожая на этих вариантах.

Применение ирлитов также значительно повышало хозяйственный вынос ТМ по сравнению с контрольным и фоновым вариантами в связи с более высоким урожаем, но заметно уступало вариантам с применением навоза.

Заключение. Таким образом, применение агроメリорантов и органических удобрений (известняковая мука, местные цеолитоподобные глины – ирлиты, полуперепревший навоз) на загрязненной тяжелыми металлами почве является высокоэффективным приемом детоксикации почв и снижения поступления ТМ из почвы и растения картофеля.

Поскольку ботва картофеля поглощает из почвы и накапливает в своей массе значительно больше количества тяжелых металлов (до 12-14 раз и более), превосходящие их содержание в

клубнях и не используется в хозяйственных целях, то сбор ее с последующим отчуждением | можно считать одним из способов детоксикации почв от тяжелых металлов.

Список использованной литературы:

1. Алиев Ш. А. Агротелиоранты как средство экологизации земледелия / Ш. А. Алиев // Агротехнический вестник. – 2001. – №6. – С. 26-28.
2. Ковальский В. В. Геохимическая экология / В. В. Ковальский. – М. : Наука, 1974. – 295 с.
3. Минеев В. Г. Агротехника и биосфера / В. Г. Минеев. – М. : Колос, 1984. – 245 с.
4. Методические указания по проведению исследований по теме: «Изучить транслокацию тяжелых металлов в почве, сельскохозяйственной продукции и разработать приемы детоксикации почв для получения чистой продукции. – М., 1993. – 18 с.
5. Овчаренко М. М. Факторы почвенного плодородия и загрязнения продукции тяжелыми металлами / М. М. Овчаренко, В. В. Бабкин, Н. А. Кирпичников // Агротехнический вестник. – 1998. – №3. – С. 31-34.
6. Оглуздин А. С. Сапропель как мелиорант почв, загрязненных тяжелыми металлами / А. С. Оглуздин, Ю. В. Алексеев, Н. И. Вялушкина // Химия в сельском хозяйстве. – 1996. – №4. – С. 5-7.
7. Огороков В. В. Механизм рекультивации почв, загрязненных тяжелыми металлами / В. В. Огороков // Плодородие. – 2004. – №1 (10). – С. 28-30.
8. Сокаев К. Е. Агротехнический мониторинг почв и эффективность удобрений в Предгорьях Центрального Кавказа / К. Е. Сокаев. – Владикавказ, 2009. – 287 с.
9. Шильников И. А. Проблемы известкования почв / И. А. Шильников, Н. А. Кирпичников, Л. П. Удалова, Г. Е. Гришин [и др.] // Химия в сельском хозяйстве. – 1996. – №5. – С. 18-21.

ДЕТОКСИКАЦІЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Г. П. Хубаєва, К. Е. Сокаєв, С. А. Бекузарова

В статті наведені результати трьохрічних досліджень в мікропольовому досліді з вивчення дії вапна, гною та місцевих цеолітоподібних глин-ірлітів на детоксикацію ґрунтів від важких металів та отримання екологічно чистої рослинницької продукції при вирощуванні картоплі.

Ключові слова: ґрунт, важкі метали, забруднення, вапно, гній, ірліт, картопля, гичка, детоксикація.

DETOXICATION OF SOILS WITH HEAVY METALS

G.P. Hubaeva, K.E. Sokaev, S.A. Bekuzarova

The results of three – year investigation on the microfield experiment with study of efficiency of manure, lime and local geolitelike clay-irlits on soil detoxication from heavy metals and obtaining of ecologically pure plant – growing production during potato growing period are shown in the article.

Keywords: soil, heavy metals, pollution, lime, manure, irlits, potato tubers, leafy tops of root vegetables, detoxication.

Надійшла до редакції: 26.04.2014 р.

Рецензент: Харченко О.В,

УДК 631.81:631.445.2(477.8)

ВПЛИВ СИСТЕМ УДОБРЕННЯ КУЛЬТУР У ПОЛЬОВІЙ СІВОЗМІНІ НА ВМІСТ ВАЛОВОГО ФОСФОРУ В ТЕМНО-СІРОМУ ОПІДЗОЛЕНОМУ ҐРУНТІ ЗАХІДНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

В. І. Лопушняк, д.с.-г.н., доцент, Львівський національний аграрний університет

Встановлено, що найвищі показники вмісту валового фосфору в темно-сірому опідзоленому ґрунті забезпечувала органо-мінеральна система удобрення з внесенням 40 т/га гною + 15 т/га сидерату + 5 т/га соломи + $N_{50}P_{85}K_{113}$. Вона сприяла нагромадженню валового фосфору на рівні 1038 та 884 мг/кг ґрунту відповідно в орному (0 – 20 см) і підорному (20 – 40 см) шарах ґрунту, що на 217 і 222 мг/кг ґрунту переважало показники контролю.

Ключові слова: валовий фосфор, темно-сірий опідзолений ґрунт, система удобрення, короткочасна польова сівозмінна.

Постановка проблеми. Фосфатний режим є характерною ознакою рівня ефективної родючості ґрунту та ступеня його окультурення. У сучасному сільськогосподарському виробництві проблема фосфору ускладнюється гострим дефіцитом і дороговизною фосфорних добрив, незбалансованістю співвідношення між внесенням азоту,

фосфору і калію. Тому пошук нових резервів поліпшення фосфорного живлення сільськогосподарських культур через упровадження оптимальних систем удобрення культур у сівозміні залишається важливим завданням аграрної науки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Однією з найважливіших якісних ознак фосфат-