

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.333.004.5:620.193.4

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-94-102>

## Коррозионная активность минеральных удобрений и защитные свойства хелатного комплекса меди для сельскохозяйственной техники

*С.М. Гайдар<sup>1</sup>, С.М. Ветрова<sup>2</sup>, А.С. Барчукова<sup>3</sup>*<sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>1</sup> [techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961><sup>2</sup> [s.vetrova@rgau-msha.ru](mailto:s.vetrova@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0009-0004-8979-4368><sup>3</sup> [barchukova@rgau-msha.ru](mailto:barchukova@rgau-msha.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>

**Аннотация.** Коррозия сельскохозяйственной техники при контакте с минеральными удобрениями представляет серьезную проблему, приводящую к значительным экономическим потерям и снижению ее эксплуатационных характеристик. Исследования проведены с целью проверки гипотезы об антикоррозионном защитном действии хелатного комплекса меди и его способности образовывать защитные пленки на поверхности металлов. Исследовали коррозионное воздействие на конструкционную сталь Ст3, применяемую при изготовлении элементов сельскохозяйственной техники, водных растворов минеральных удобрений: карбамида, аммиачной селитры, двух видов азотно-фосфорно-калийно-серосодержащих удобрений и микроудобрения, включающего в себя хелатный комплекс меди. Диапазон концентрации растворов 0,5...3% по массе обусловлен приближением к реальным условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники. В качестве контрольной среды использовали дистиллированную воду. Коррозионную стойкость определяли в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Гравиметрическим методом установлено, что аммиачная селитра проявляет наиболее высокую коррозионную активность – 1,2172...1,8937 г/м<sup>2</sup>·ч, превышающую контрольный образец в 8,5 раза, в то время как хелатный комплекс меди демонстрирует выраженные ингибирующие свойства со скоростью коррозии 0,0008...0,0019 г/м<sup>2</sup>·ч, что на 99% ниже контроля. Электрохимические исследования выполняли в потенциодинамическом режиме с использованием потенциостата Autolab PGSTAT 302N. Потенциодинамические измерения, проведенные в соответствии с ГОСТ 9.509-89, показали, что хелат меди является анодным ингибитором, смещающим потенциал коррозии в положительную сторону на 0,34...0,59 В. Подтверждена гипотеза и установлен механизм защитного действия хелата меди через образование адсорбционной пленки на поверхности стали. Для снижения коррозионной активности рабочих растворов, контактирующих с элементами сельскохозяйственной техники, предложено использовать хелат меди как бифункциональное средство (микроудобрение + ингибитор коррозии).

**Ключевые слова:** коррозия; коррозия сельскохозяйственной техники; коррозионная активность; сталь Ст3; удобрение; хелат меди; ингибитор коррозии; скорость коррозии

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках проекта по созданию и развитию инжинирингового центра РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (соглашение № 075-15-2025-543 от 16 июня 2025 г.).

**Для цитирования:** Гайдар С.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. Коррозионная активность минеральных удобрений и защитные свойства хелатного комплекса меди для сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 3. С. 94-102. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-94-102>

## ORIGINAL ARTICLE

## Corrosion activity of mineral fertilizers and protective properties of a copper chelate complex for agricultural machinery

S.M. Gaidar<sup>1</sup>, S.M. Vetrova<sup>2</sup>, A.S. Barchukova<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

<sup>1</sup> techmash@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>

<sup>2</sup> s.vetrova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>

<sup>3</sup> barchukova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>

**Abstract.** Corrosion of agricultural machinery exposed to mineral fertilizers represents a critical issue, leading to substantial economic losses and deterioration of operational performance. The study aimed to test the hypothesis that a copper chelate complex exhibits anticorrosion properties and is capable of forming protective films on metal surfaces. The corrosion behavior of structural steel St3, widely used in agricultural machinery components, was investigated in aqueous solutions of various mineral fertilizers, including urea, ammonium nitrate, two types of nitrogen-phosphorus-potassium sulfur-containing fertilizers, and a micronutrient fertilizer containing a copper chelate complex. The solution concentration range (0.5-3 wt%) was selected to simulate realistic operating conditions for agricultural machinery. Distilled water served as the reference medium. Corrosion resistance was evaluated in accordance with GOST 9.908-85 using the gravimetric method. The results demonstrated that ammonium nitrate exhibits the highest corrosion activity, with a corrosion rate ranging from 1.2172 to 1.8937 g/m<sup>2</sup>·h, exceeding that of the control by a factor of 8.5. In contrast, the copper chelate complex showed pronounced inhibiting properties, reducing the corrosion rate to that between 0.0008 and 0.0019 g/m<sup>2</sup>·h, which corresponds to a reduction of approximately 99% relative to the control. Electrochemical studies were performed under potentiodynamic conditions using an Autolab PGSTAT 302N potentiostat. Measurements conducted in accordance with GOST 9.509-89 revealed that the copper chelate acts as an anodic inhibitor, shifting the corrosion potential toward more positive values by 0.34-0.59 V. The hypothesis was thus confirmed, and the corrosion protection mechanism was attributed to the formation of an adsorption film on the steel surface. The use of copper chelate is proposed as a bifunctional agent – serving simultaneously as a micronutrient fertilizer and a corrosion inhibitor – to reduce the corrosion activity of working solutions in contact with agricultural machinery components.

**Keywords:** corrosion; agricultural machinery corrosion; corrosion activity; St3 steel; mineral fertilizers; copper chelate; corrosion inhibitor; corrosion rate

**Funding.** This work was carried out within the framework of the project for the establishment and development of the Engineering Center of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Agreement No. 075-15-2025-543 dated June 16, 2025).

**For citation:** Gaidar S.M., Vetrova S.M., Barchukova A.S. Corrosion activity of mineral fertilizers and protective properties of a copper chelate complex for agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(3):94-102. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-3-94-102>

### Введение

Коррозия сельскохозяйственной техники является одной из наиболее актуальных проблем, приводящей к существенным экономическим потерям. По различным оценкам, ущерб от коррозии достигает 2,1...3,0% валового внутреннего продукта страны<sup>1</sup>, при этом значительная доля приходится на агропромышленный комплекс. Особенностью сельскохозяйственной техники является сезонный характер эксплуатации и необходимость длительного межсезон-

ного хранения, что создает благоприятные условия для развития коррозионных процессов [1].

Минеральные удобрения, являясь основой интенсивного земледелия, одновременно представляют собой высокоагрессивные среды по отношению к металлическим конструкциям. Коррозионное воздействие удобрений обусловлено их способностью к диссоциации в водных растворах с образованием электролитов, а также наличием кислых и щелочных компонентов, изменяющих pH среды [2-4].

Аммиачная селитра (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) – одно из наиболее распространенных азотных удобрений, обеспечивающих высокую эффективность питания растений. Однако данное удобрение вследствие гидролиза

<sup>1</sup> Романченко Н.М., Романченко Н.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии: Учебное пособие. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2016. 188 с. EDN: KRWJOE.

отличается высокой коррозионной активностью с образованием азотной кислоты, разрушающей защитные оксидные пленки на стальных поверхностях [2]. Комплексные NPK-удобрения, включая серосодержащие азотно-фосфорно-калийные марки, также проявляют значительную агрессивность, особенно в кислой среде, что связано с присутствием различных солей и их взаимодействием с металлом. Карбамид (мочевина), несмотря на высокое содержание азота, демонстрирует меньшую коррозионную активность благодаря амидной форме азота и слабой электролитической диссоциации [2].

Традиционные методы защиты металлического оборудования от коррозии включают в себя применение консервационных масел и ингибиторов коррозии [5-7]. Использование перечисленных средств в агропромышленном комплексе осложняется необходимостью обеспечения экологической безопасности и сохранения качества сельскохозяйственной продукции [8]. В этой связи особый интерес представляют бифункциональные соединения, сочетающие свойства микроудобрений и ингибиторов коррозии [9].

Хелатные комплексы микроэлементов широко применяются в современном растениеводстве благодаря высокой биодоступности питательных веществ. Хелаты меди используются для корневых и некорневых подкормок различных сельскохозяйственных культур, улучшения фотосинтеза, повышения устойчивости к заболеваниям и увеличения урожайности. Медь входит в состав ключевых ферментов, участвующих в процессах дыхания (компонент цитохром-с-оксидазы), фотосинтеза (входит в состав пластоцианина) и метаболизме белков и углеводов, что делает медьсодержащие микроудобрения важным элементом технологии возделывания картофеля, зерновых и овощных культур [10, 11].

Предварительные исследования показали, что хелатные комплексы меди могут образовывать защитные пленки на поверхности металлов, что открывает перспективы их использования в качестве экологически безопасных ингибиторов коррозии [7, 9]. Механизм защитного действия связан с адсорбцией хелатных молекул на металлической поверхности и образованием координационных связей, препятствующих электрохимическим реакциям. При этом биоразлагаемость органических компонентов хелатов обеспечивает их экологическую приемлемость для применения в сельском хозяйстве.

Необходимо проверить гипотезу о защитном действии хелата меди и его способности образовывать защитные пленки на поверхности металлов

**Цель исследований:** оценка влияния водных растворов минеральных удобрений и хелатного

комплекса меди на скорость коррозии стали Ст3 и установление механизма защитного действия хелата меди на основе гравиметрических и электрохимических исследований.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований использовали конструкционную сталь Ст3, широко применяемую при изготовлении элементов сельскохозяйственных машин и оборудования, контактирующих с растворами минеральных удобрений (бункеры, трубопроводы, дозирующие узлы, емкости).

Образцы для гравиметрических испытаний изготовлены в форме пластин размером  $50 \times 30 \times 3$  мм с просверленными отверстиями для подвеса в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Перед испытаниями поверхность образцов подвергали механической обработке абразивной бумагой с последовательным уменьшением зернистости (P320, P600, P1000), обезжириванию этиловым спиртом и высушиванию при комнатной температуре. Массу каждого образца определяли с точностью до 0,0001 г на аналитических весах.

Для электрохимических исследований использовали пластины диаметром 16 мм с рабочей поверхностью 0,785 см<sup>2</sup>. Перед измерениями поверхность шлифовали, полировали до зеркального блеска и обезжиривали ацетоном.

Исследовали 5 видов водных растворов минеральных удобрений концентрацией 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0% по массе [2]:

1. Карбамид (мочевина,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) – амидная форма азотного удобрения с содержанием азота 46%.

2. NPK 1 – азотно-фосфорно-калийное серосодержащее удобрение марки «NPK(S) 8-20-30 (2)» фирмы «ФОСАГРО». Содержание: азот общий – 8%; фосфаты (в пересчете на  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) – 20%; калий (в пересчете на  $\text{K}_2\text{O}$ ) – 30%; массовая доля сульфатов (в пересчете на S) – 2...5%.

3. NPK 2 – азотно-фосфорно-калийное серосодержащее удобрение марки 16-16-16-6 (S) фирмы «BelFert белорусские удобрения». Содержание: азот общий – 16%; фосфаты (в пересчете на  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) – 16%; калий (в пересчете на  $\text{K}_2\text{O}$ ) – 16%; массовая доля сульфатов (в пересчете на S) – 6%.

4. Аммиачная селитра (нитрат аммония,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) – азотное удобрение с содержанием азота 34,4%.

5. Хелатный комплекс меди – микроудобрение, содержащее медь в хелатной форме.

Выбор диапазона концентраций минеральных удобрений 0,5...3,0% по массе обусловлен приближением к реальным условиям эксплуатации сельскохозяйственной техники. Указанные значения соответствуют разбавленным рабочим растворам,

которые могут образовываться при промывке бункеров, трубопроводов и дозирующих узлов. При этом концентрации 1...3% были использованы для гравиметрических испытаний как наиболее репрезентативные для длительного контакта металла с растворами.

В качестве контрольной среды использовали дистиллированную воду (ГОСТ 6709-72). Растворы готовили непосредственно перед началом экспериментов путем растворения точных навесок удобрений в дистиллированной воде при комнатной температуре ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ). Значение pH растворов измеряли с помощью pH-метра с точностью  $\pm 0,01$ .

Определение скорости коррозии выполняли гравиметрическим методом в соответствии с ГОСТ 9.908-85. Предварительно взвешенные образцы стали помещали в стеклянные сосуды объемом 400 мл, содержащие исследуемые растворы, в соотношении площади поверхности образца к объему раствора  $1\text{см}^2:10\text{мл}$ . Образцы подвешивали на стеклянных палочках таким образом, чтобы исключить их контакт между собой и со стенками сосуда.

Испытания проводили в статических условиях при комнатной температуре ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ) в течение 10 суток (240 ч). По завершении экспозиции образцы извлекали из растворов, промывали дистиллированной водой и удаляли продукты коррозии химическим методом путем погружения в ингибированный раствор соляной кислоты с добавлением уротропина. После тщательной промывки и высушивания образцы повторно взвешивали.

Скорость коррозии определяли по убыли массы образца:

$$K = \Delta m / (S \cdot t),$$

где  $K$  – скорость коррозии,  $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $\Delta m$  – убыль массы образца, г;  $S$  – площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ ;  $t$  – время испытания, ч.

Для каждого варианта опыта использовали три параллельных образца; результаты усредняли. Визуальную оценку характера коррозионных поражений выполняли до и после удаления продуктов коррозии с фотографической фиксацией.

Электрохимические исследования проводили в потенциодинамическом режиме с использованием потенциостата Autolab PGSTAT 302N с программным обеспечением Nova 2.1.5 в стандартной трехэлектродной ячейке. В качестве рабочего электрода служил исследуемый образец стали Ст3, электрода сравнения – насыщенный хлорсеребряный электрод (н.х.э.), вспомогательного электрода – платиновая пластина.

Перед снятием поляризационных кривых рабочий электрод выдерживали в исследуемом растворе в течение 5 мин до установления стационарного потенциала коррозии ( $E_{\text{кор}}$ ). Потенциодинамические измерения выполняли в диапазоне от  $-250$  до  $+250$  мВ относительно потенциала коррозии при скорости развертки потенциала  $1...2$  мВ/с в соответствии с ГОСТ 9.509-89. По полученным поляризационным кривым методом тафелевской экстраполяции определяли потенциал коррозии ( $E_{\text{кор}}$ ) и плотность тока коррозии ( $I_{\text{кор}}$ ). Характер смещения потенциала коррозии позволял установить тип ингибитора (анодный, катодный или смешанный).

Все эксперименты проводили при температуре  $20\pm 2^\circ\text{C}$  в условиях естественной аэрации растворов. Значения pH растворов контролировали в начале и по окончании экспериментов. Каждое измерение выполняли не менее трех раз; результаты статистически обрабатывались с расчетом среднего значения и стандартного отклонения.

### Результаты и их обсуждение

Результаты гравиметрических испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Скорость коррозии стали Ст3 в растворах минеральных удобрений после 10 суток экспозиции

Table 1

Corrosion rate of St3 steel in mineral fertilizer solutions after 10 days of exposure

№	Раствор минерального удобрения	Концентрация раствора минерального удобрения, %					
		1,0		2,0		3,0	
		pH	Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	pH	Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	pH	Скорость коррозии, $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
1	Карбамид	7,08	0,1783	7,34	0,1841	7,38	0,1655
2	NPK 1	7,16	0,0214	7,10	0,0243	7,04	0,0312
3	NPK 2	5,35	0,1241	5,15	0,2656	5,02	0,2773
4	Аммиачная селитра	5,45	<b>1,2172</b>	5,40	<b>1,4976</b>	5,27	<b>1,8937</b>
5	Хелатный комплекс меди	10,48	0,0008	10,53	0,0019	10,59	0,0013

**Примечание.** В качестве контроля использовали дистиллированную воду pH = 6,34. Скорость коррозии в контроле составила  $0,1439 \text{ г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Анализ данных показал, что наибольшей коррозионной активностью обладает аммиачная селитра: в 1%-ном растворе скорость коррозии стали составила 1,2172 г/(м<sup>2</sup>·ч), что в 8,5 раза превышает контрольное значение, в 3%-ном растворе скорость коррозии возрастает до 1,8937 г/(м<sup>2</sup>·ч). Это связано с гидролизом NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> с образованием азотной кислоты и, соответственно, со снижением pH раствора с 5,45 до 5,27, с повышением электропроводности вследствие полной диссоциации соли, способности аммиака образовывать растворимые комплексы с ионами железа, препятствующие формированию устойчивых пассивных пленок.

Визуальный осмотр образцов после экспозиции в растворах аммиачной селитры (рис. 1) показал интенсивное образование рыхлых продуктов коррозии красно-бурого цвета, характерных для гидроксидов и оксидов железа. После удаления коррозионных наслоений наблюдали следы повреждения поверхности образцов, что свидетельствует о развитии общей равномерной коррозии.

Азотно-фосфорно-калийное удобрение NPK 2 характеризуется нелинейным ростом коррозионной активности: при увеличении концентрации раствора от 1 до 2% скорость коррозии возрастает более чем в два раза, тогда как дальнейшее увеличение до 3% приводит лишь к небольшому приросту. Такой характер объясняется частичным экранированием поверхности солевыми отложениями при высоких концентрациях, что ограничивает доступ агрессивной среды к металлу.

NPK 1 при значениях pH, близких к нейтральным (около 7,0...7,2), проявляет значительно меньшую коррозионную активность, чем NPK 2, что свидетельствует о важной роли кислотности и состава анионов в формировании агрессивности раствора.

Карбамид, несмотря на высокое содержание азота, оказывает умеренное коррозионное воздействие, сопоставимое с контролем. Близкие к нейтральным значениям pH и слабая электролитическая диссоциация обуславливают умеренное коррозионное воздействие на сталь Ст3. С ростом концентрации карбамида от 2 до 3% наблюдается незначительное снижение скорости коррозии стали Ст3. Данная особенность связана с формированием на поверхности образцов более плотного слоя продуктов коррозии, частично экранирующих металл от раствора.

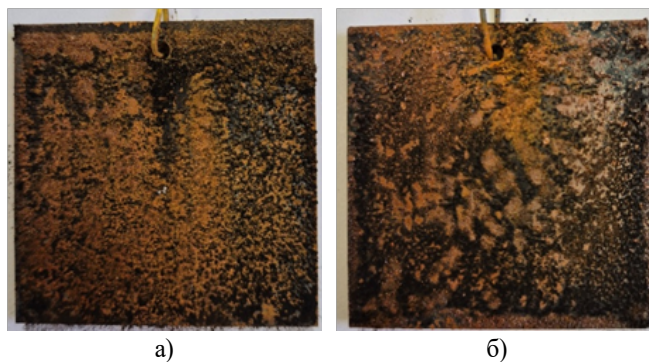
Хелатный комплекс меди показал выраженные ингибирующие свойства. Скорость коррозии стали в его растворе составила 0,0008...0,0019 г/(м<sup>2</sup>·ч), что соответствует лишь 0,6...1,3% от контрольного значения. Эффективность ингибирования достигает 98,7...99,4%. Щелочное значение pH (10,48...10,59)

способствует пассивации, однако основной вклад в защиту вносит формирование хелатной защитной пленки на поверхности металла.

Механизм защитного действия хелатного комплекса меди заключается в адсорбции его молекул на поверхности стали с образованием координационных связей между атомами железа и функциональными группами хелатирующего состава. Образующаяся мономолекулярная пленка обладает гидрофобными свойствами, препятствуя доступу воды и кислорода к металлической поверхности.

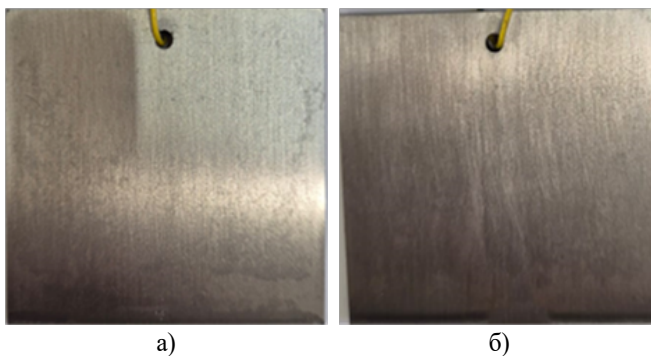
Визуальный осмотр образцов стали после экспозиции в растворе хелатного комплекса меди (рис. 2) показал отсутствие видимых коррозионных поражений, сохранение металлического блеска и образование тонкой равномерной пленки голубоватого оттенка, характерной для соединений меди. Поверхность оставалась гладкой и без признаков коррозии.

В контроле – экспозиция в дистиллированной воде (рис. 3) – также происходит формирование



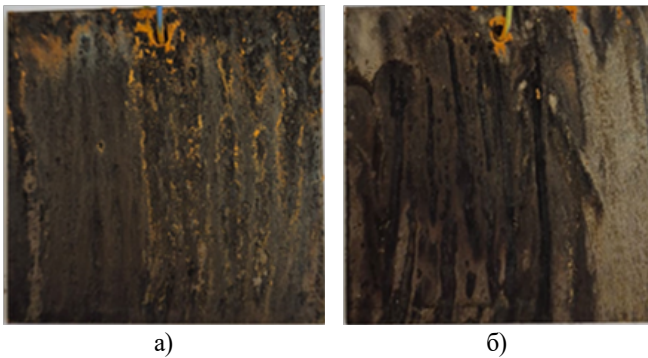
**Рис. 1. Вид образца после экспозиции в растворе аммиачной селитры:**  
а) правая сторона; б) левая сторона

**Fig. 1. Appearance of the sample after exposure in ammonium nitrate solution:**  
a) right side; b) left side



**Рис. 2. Вид образца после экспозиции в растворе хелатного комплекса меди:**  
а) правая сторона; б) левая сторона

**Fig. 2. Appearance of the sample after exposure in copper chelate complex solution:**  
a) right side; b) left side



**Рис. 3. Вид образца после экспозиции в воде (контрольный образец):**  
а) правая сторона; б) левая сторона

**Fig. 3. Appearance of the sample after exposure in water (control sample):**  
a) right side; b) left side

продуктов коррозии, хотя и в значительно меньшей степени, чем в агрессивных средах минеральных удобрений.

Результаты потенциодинамических измерений основных растворов минеральных удобрений и хелата меди концентрацией 0,5; 1,5 и 3,0% представлены в таблице 2.

Анализ поляризационных кривых показал, что минеральные удобрения существенно изменяют электрохимическое поведение стали Ст3. По сравнению с дистиллированной водой аммиачная селитра смещает потенциал коррозии в отрицательную сторону (до  $-0,62651$  В), что свидетельствует об активизации анодного растворения железа. С ростом концентрации раствора аммиачной селитры плотность тока коррозии увеличивается от  $338 \cdot 10^{-8}$  до  $1460 \cdot 10^{-8}$  А, что подтверждает высокую коррозионную активность данного удобрения.

С ростом концентрации NPK 2 ток коррозии увеличивается от  $466 \cdot 10^{-8}$  до  $1650 \cdot 10^{-8}$  А. По сравнению с дистиллированной водой потенциал коррозии

смещен в отрицательную область (до  $-0,69646$  В), причем это смещение более выражено, чем у аммиачной селитры, несмотря на несколько больший ток коррозии. Это указывает на активизацию анодного процесса при одновременном торможении катодной реакции вследствие многокомпонентного состава удобрения.

Раствор NPK 1 характеризуется средними значениями тока коррозии в диапазоне  $148 \cdot 10^{-8} \dots 881 \cdot 10^{-8}$  А. Отрицательное смещение потенциала коррозии (от  $-0,69848$  до  $-0,73222$  В) при относительно умеренном токе коррозии свидетельствует о сложном многокомпонентном составе раствора, влияющем на кинетику как анодных, так и катодных процессов.

Карбамид характеризуется низкими значениями тока коррозии ( $19,3 \cdot 10^{-8} \dots 22,9 \cdot 10^{-8}$  А), что коррелирует с результатами гравиметрических испытаний. Диапазон потенциала коррозии ( $-0,36822 \dots -0,45191$  В) близок значению дистиллированной воды, что подтверждает слабую электролитическую природу карбамида и его низкую коррозионную активность.

Хелатный комплекс меди проявляет электрохимическое поведение, отличающееся от всех других исследованных сред. Потенциал коррозии смещается в положительную сторону (от  $-0,11265$  до  $-0,15184$  В), что на  $0,26 \dots 0,30$  В является более положительным, чем в дистиллированной воде, и на  $0,34 \dots 0,59$  В более положительным, чем в растворах других удобрений. Это является характерным признаком анодного ингибитора, переводящего металл в область пассивации.

Плотность тока коррозии в присутствии хелатного комплексного меди низка ( $4,39 \cdot 10^{-8} \dots 15,4 \cdot 10^{-8}$  А), что ниже и сопоставимо с контрольным значением в дистиллированной воде ( $18,44 \cdot 10^{-8}$  А). При концентрации 0,5% достигается минимальное значение тока

**Результаты потенциодинамического исследования растворов минеральных удобрений**

Таблица 2

**Results of the potentiodynamic study of mineral fertilizer solutions**

Table 2

Название	Концентрация раствора минеральных удобрений, %					
	0,5		1,5		3,0	
	$-E_{кор}$ , В	$I_{кор} \cdot 10^{-8}$ , А	$-E_{кор}$ , В	$I_{кор} \cdot 10^{-8}$ , А	$-E_{кор}$ , В	$I_{кор} \cdot 10^{-8}$ , А
Аммиачная селитра	-0,62651	338	-0,60925	430	-0,58268	1460
Карбамид	-0,45191	22,9	-0,36822	17,7	-0,36887	19,3
Хелатный комплекс меди	-0,11265	4,39	-0,13808	5,07	-0,15184	15,4
NPK 1	-0,69848	148	-0,73222	527	-0,72815	881
NPK 2	-0,69646	466	-0,68764	638	-0,68079	1650

**Примечание.** В контроле (дистиллированной воде) потенциал коррозии достиг  $E_{кор} = -0,41505$  В, плотность тока коррозии составила  $I_{кор} = 18,44 \cdot 10^{-8}$  А.

коррозии ( $4,39 \cdot 10^{-8}$  А), что соответствует эффективности ингибирования 76% по сравнению с контролем. При увеличении концентрации до 3,0% плотность тока коррозии возрастает до  $15,4 \cdot 10^{-8}$  А, однако остается значительно ниже, чем в среде других удобрений.

Анализ формы поляризационных кривых (рис. 4) показывает, что в присутствии хелатного комплекса меди наблюдается существенное торможение анодной реакции растворения железа (уменьшение наклона анодной ветви) при умеренном ускорении катодной реакции восстановления кислорода. Положительное смещение потенциала коррозии в сочетании с преимущественным торможением анодного процесса характеризует хелатный комплекс меди как ингибитор анодного типа.

Механизм анодного ингибирования заключается в адсорбции молекул хелата на анодных участках поверхности стали с образованием защитного слоя, препятствующего переходу ионов железа в раствор.

Важным фактором дополнительной защиты является высокое щелочное значение pH растворов хелатного комплекса меди (10,48...10,59). В таких условиях на поверхности стали формируется пассивная оксидно-гидроксидная пленка, состоящая преимущественно из соединений железа (III) ( $Fe_3O_4$ ,  $FeOOH$  и др.). Синергетический эффект щелочной среды и адсорбции хелатных молекул обеспечивает более высокую степень защиты, чем могла бы дать одна лишь щелочность.

Практическая значимость применения хелата меди в растениеводстве связана с его использованием в качестве эффективного микроудобрения. Применение хелатов меди при возделывании картофеля обеспечивает повышение урожайности на 6,2...15,6%, улучшение товарности клубней на 1,8...3,4% [11].

Хелатная форма меди характеризуется более высокой биодоступностью по сравнению с неорганическими солями (сульфатом и хлоридом меди), в ряде случаев обеспечивая в несколько раз более

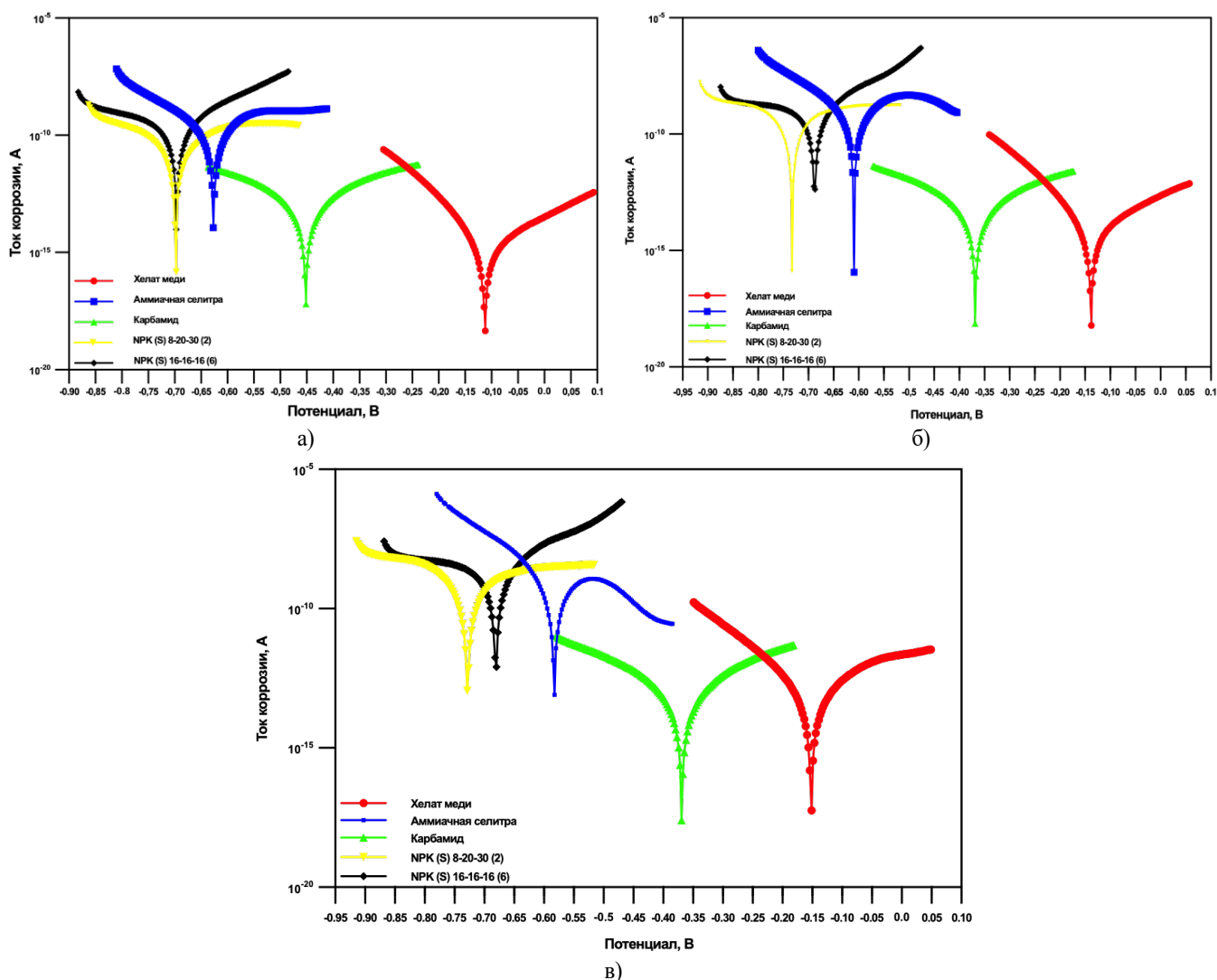


Рис. 4. Поляризационные кривые стали Ст3 при концентрации растворов удобрений 0,5% (а), 1,5% (б) и 3,0% (в)  
 Fig. 4. Polarization curves of St3 steel at fertilizer solution concentrations of 0.5% (a), 1.5% (b), and 3.0% (c)

эффективное усвоение элементарной меди растениями. С учетом выявленных ингибирующих свойств хелатный комплекс меди может рассматриваться как потенциальный компонент технологических растворов, совмещающих функции питания растений и снижения коррозионной активности среды по отношению к конструкционной стали.

Таким образом проведенные исследования показывают, что хелатный комплекс меди обладает уникальным сочетанием свойств, делающим его перспективным бифункциональным средством для применения в сельском хозяйстве.

### Выводы

1. Коррозионная активность минеральных удобрений по отношению к стали Ст3 различается: аммиачная селитра характеризуется максимальной агрессивностью; удобрение NPK 2 занимает промежуточное положение; NPK 1 и карбамид оказывают меньшее коррозионное воздействие.

2. Раствор аммиачной селитры концентрацией 1...3% отличается наивысшей скоростью коррозии стали Ст3 1,2172...1,8937 г/м<sup>2</sup>·ч, что в 8,5 раза выше значения контрольного образца в дистиллированной

воде. Это можно объяснить гидролизом соли с образованием азотной кислоты, полной электролитической диссоциацией и высокой электропроводностью раствора.

3. Хелатный комплекс меди продемонстрировал выраженные ингибирующие свойства. Скорость коррозии стали Ст3 составила 0,0008...0,0019 г/м<sup>2</sup>·ч (0,6...1,3%). Эффективность ингибирования достигает 99%.

4. Потенциодинамические исследования показали, что хелатный комплекс меди является ингибитором анодного типа: потенциал коррозии смещается в положительную сторону на 0,34...0,59 В; плотность тока коррозии снижается до 4,39...15,4·10<sup>-8</sup> А.

5. Механизм защитного действия хелатного комплекса меди связан с адсорбцией хелатных молекул на поверхности стали и формированием координационно закрепленного защитного слоя. В щелочной среде раствора это приводит к пассивации стали и уменьшению скорости коррозии.

6. Хелат меди, замедляющий процесс коррозии, можно добавлять в рабочие растворы при межсезонной промывке, заполнении бункеров и трубопроводов сельскохозяйственных машин.

### Список источников

- Кузнецов Р.А., Дробышев И.А., Бахарев А.А. Анализ применяемых способов и средств для консервации транспортно-технологических машин // Наука и образование. 2022. Т. 5, № 2. С. 220. EDN: KDCEUF
- Барчукова А.С., Ветрова С.М., Илюшкова Е.М. Исследование скорости коррозии стали Ст3 в среде минеральных удобрений // АгроЭкоИнфо. 2024. № 6 (66). С. 45. EDN: INBHSS
- Горностаева Г.Е., Редькина Г.В., Кузнецов Ю.И. Ингибирование коррозии низкоуглеродистой стали в растворах сульфата аммония // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37, № 2 (264). С. 33-35. EDN: DRGSYU
- Fachikov L., Ionova D., Tzaneva B. Corrosion of low-carbon steels in aqueous solutions of ammonium sulfate mineral fertilizer. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 2006;41(1):21-24. <https://journal.uctm.edu/node/j2006-1/03-Fachikov-str-21-24.pdf>
- Успенский И.А., Фадеев И.В., Пестряева Л.Ш. и др. Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3. С. 365-376. EDN: UMMBAX
- Жаксыбаева А.Г., Хамитова А.С. Ингибиторы коррозии для сохранения металлических изделий // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 12-1. С. 23-26. EDN: TFGLCV
- Барчукова А.С., Ветрова С.М. Исследование противокоррозионных свойств водорастворимого ингибитора // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. 2025. № 3. С. 159-163. EDN: LHQNVR
- Ушаков И.А., Никонова В.С., Полынский И.В. и др. Исследование эффективности ингибиторов коррозии на основе производных изотируниевых солей // Известия

### References

- Kuznetsov R.A., Drobyshev I.A., Bakharev A.A. Analysis of the applied methods and means for preservation of transport and technological machines. *Nauka i obrazovanie*. 2022;5(2):220. (In Russ.)
- Barchukova A.S., Vetrova S.M., Ilyushkova E.M. Study of steel corrosion ST3 rate in mineral fertilizer environment. *AgroEkoInfo*. 2024;6:45. (In Russ.)
- Gornostaeva G.E., Redkina G.V., Kuznetsov Yu.I. Corrosion inhibition of mild steel in ammonium sulfate solutions. *Uspeski v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2023;37(2):33-35. (In Russ.)
- Fachikov L., Ionova D., Tzaneva B. Corrosion of low-carbon steels in aqueous solutions of ammonium sulfate mineral fertilizer. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. 2006;41(1):21-24. <https://journal.uctm.edu/node/j2006-1/03-Fachikov-str-21-24.pdf>
- Uspensky I.A., Fadeev I.V., Pestrjaeva L.Sh. et al. New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2020;3:365-376. (In Russ.)
- Zhaksybaeva A.G., Khamitova A.S. Corrosion inhibitors for preservation of metal products. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2014;12-1:23-26. (In Russ.)
- Barchukova A.S., Vetrova S.M. Investigation of anticorrosive properties of a water-soluble inhibitor. *Vestnik Chuvash State Agrarian University*. 2025;3:159-163. (In Russ.)
- Ushakov I.A., Nikonova V.S., Polynskii I.V. et al. Study on efficiency of corrosion inhibitors based on derivatives of isothiourea salts. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(2):326-332. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-326-332>
- Barchukov A.S., Vetrova S.M., Lapsar O.M., Pikina A.M. Anticorrosive properties of the BORAM fertilizer and its effect on the potato yield. *Agricultural*

вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11, № 2. С. 326-332. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-2-326-332>

9. Барчукова А.С., Ветрова С.М., Лапсарь О.М., Пикина А.М. Антикоррозийные свойства удобрения БОРАМ и его влияние на урожайность картофеля // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 4. С. 61-67. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-61-67>

10. Кузнецов Д.А., Прокина Л.Н., Ибрагимова Г.Н., Калинина А.Д. Влияние хелатной формы микроудобрения (микровит) на фоне применения высоких доз минеральных удобрений на урожайность сортов картофеля ранней группы спелости // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2017. № 1. С. 40-47. EDN: XVRTYF

11. Барчукова А.С., Ветрова С.М. Эффективность применения хелатного комплекса меди при возделывании картофеля // АгроЭкоИнженерия. 2025. № 2. С. 27-38. EDN: YIMYVQ

#### Информация об авторах

<sup>1</sup> **Гайдар Сергей Михайлович**, д-р техн. наук, профессор; <https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>;

[techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru); SPIN-код: 6714-3698

<sup>2</sup> **Ветрова Софья Михайловна**, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>;

[s.vetrova@rgau-msha.ru](mailto:s.vetrova@rgau-msha.ru); SPIN-код: 2176-3945

<sup>3</sup> **Барчукова Алина Сергеевна**, канд. техн. наук, доцент; <https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>;

[barchukova@rgau-msha.ru](mailto:barchukova@rgau-msha.ru); SPIN-код: 2129-7541

<sup>1,2,3</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

#### Вклад авторов

С.М. Гайдар – концептуализация, руководство исследованиями, методология;

С.М. Ветрова – формальный анализ, создание черновика рукописи, визуализация;

А.С. Барчукова – проведение исследований; ресурсы, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Статья поступила 07.01.2026, после рецензирования и доработки 27.04.2026, принята к публикации 14.05.2026

*Engineering (Moscow)*. 2025;27(4):61-67. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-4-61-67>

10. Kuznetsov D.A., Prokina L.N., Ibragimova G.N., Kalini-na A.D. Influence of chelate microfertilizers (microfit) application on the yield of early ripening group potato varieties on background of high doses of mineral fertilizers. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2017;1:40-47. (In Russ.).

11. Barchukova A.S., Vetrova S.M. Efficiency of applying copper chelate complex in potato growing. *AgroEkoInzheneriya*. 2025;(2):27-38. (In Russ.).

#### Author Information

**Sergey M. Gaidar**<sup>1</sup>, DSc (Eng), Professor, [techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru);

<https://orcid.org/0000-0003-4290-2961>;

ScopusAuthorID: 57191589797; ResearcherID: I-4723-2018

**Sofya M. Vetrova**<sup>2</sup>, CSc (Eng); [s.vetrova@rgau-msha.ru](mailto:s.vetrova@rgau-msha.ru);

<https://orcid.org/0009-0004-8979-4368>

**Alina S. Barchukova**<sup>3</sup>, CSc (Engr); [barchukova@rgau-msha.ru](mailto:barchukova@rgau-msha.ru)<sup>✉</sup>;

<https://orcid.org/0000-0001-7202-291X>

<sup>1,2,3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

#### Author Contribution

S.M. Gaidar – conceptualization, research supervision, methodology; S.M. Vetrova – formal analysis, writing – original draft, visualization; A.S. Barchukova – investigation, resources, writing – review and editing of the manuscript.

Received 07.01.2026; Revised 27.04.2026; Accepted 14.05.2026