

## Исследование влияния антибиотиков на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной почв

© 2022. А. Г. Космачева<sup>1</sup>, аспирант, эколог,  
С. М. Чеснокова<sup>1</sup>, к. х. н., доцент, Т. А. Трифонова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,  
<sup>1</sup>Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,  
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,  
<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,  
e-mail: hijadelaluna@mail.ru

Массовое использование антибактериальных препаратов в сельскохозяйственном производстве вызывает загрязнение окружающей среды и оказывает влияние на микробные сообщества экосистем, а также на выполняемые ими функции. Уреаза, участвующая в цикле азота, способствует расщеплению мочевины до аммиака, который является источником азотного питания растений и микроорганизмов. Объектами исследования являлись суглинистые дерново-подзолистая (Umbric Albeluvisols Abruptic) и серая лесная (Greyic Phaeozems Albic) почвы сельскохозяйственного назначения. В качестве поллютантов использовали антибиотики различных групп, отличающиеся по спектру воздействия и физико-химическим характеристикам: тилозин, бензилпенициллин, окситетрациклин. Уреазная активность дерново-подзолистой почвы без внесения антибиотиков составляла 0,951 г NH<sub>3</sub>/10 г почвы за 24 ч, серой лесной – 1,178 г NH<sub>3</sub>/10 г почвы за 24 ч. Результаты исследования демонстрируют преимущественно токсическое влияние антибиотиков на уреазную активность. Воздействие препаратов зависит как от их концентраций и свойств, так и от свойств и типа почв. Уреазная активность серой лесной почвы выше, чем дерново-подзолистой, и является более устойчивой к воздействию антибактериальных препаратов. Наибольшее токсическое влияние на уреазную активность дерново-подзолистой почвы оказала тройная смесь антибиотиков, серой лесной – тилозин, однако эти воздействия не являлись дозозависимыми ( $p > 0,05$ ). Установлены достоверные отрицательные корреляционные зависимости активности уреазы в дерново-подзолистой почве от концентрации окситетрациклина и его смеси с тилозином, в серой лесной – от концентрации бензилпенициллина и смеси окситетрациклина с тилозином ( $p < 0,05$ ).

**Ключевые слова:** антибиотики, уреазная активность, дерново-подзолистая почва, серая лесная почва.

## Study of the effect of antibiotics on the urease activity of sod-podzolic and gray forest soils

© 2022. A. G. Kosmacheva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1988-8615<sup>2</sup>  
S. M. Chesnokova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-5126-1786<sup>2</sup> T. A. Trifonova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-1628-9430<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Vladimir State University named after  
Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletovs,  
87, Gorky St., Vladimir, Russia, 600000,  
<sup>2</sup>M. V. Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,  
e-mail: hijadelaluna@mail.ru

Environmental pollution with antibacterial drugs is associated with their massive use, and can affect the microbial communities of ecosystems and their functions, which determines the relevance of the study of such effects. Urease participates in the nitrogen cycle, promotes the breakdown of urea to ammonia. Ammonia, in turn, is a source of nitrogen nutrition for plants and microorganisms. The objects of research were sod-podzolic (Umbric Albeluvisols Abruptic) and gray forest (Greyic Phaeozems Albic) agricultural soils. Antibiotics of various groups were used as pollutants, differing in the spectrum of action and physicochemical characteristics: tylosin, benzylpenicillin, oxytetracycline. The urease activity of the sod-podzolic soil without antibiotics was 0.951 g NH<sub>3</sub>/10 g soil/24 hours, gray forest soil – 1.178 g NH<sub>3</sub>/10 g soil/24 hours. The results of the study demonstrate the predominantly toxic effect of antibiotics on urease activity. The effect of drugs depends both on their concentrations and properties, and on the properties and type of soil. The urease activity of gray forest soil is higher than that of sod-podzolic soil, and is more resistant to the effects of antibacterial

drugs. A triple mixture of antibiotics had the greatest toxic effect on the urease activity of the sod-podzolic soil. Tylosin had the greatest toxic effect on the urease activity of the gray forest soil. However, these effects were not dose-dependent ( $p > 0.05$ ). Significant negative correlations were established for dependences of the urease activity of sod-podzolic soil on the concentration of oxytetracycline and its mixture with tylosin, and the urease activity of gray forest soil on the concentration of benzylpenicillin and a mixture of oxytetracycline with tylosin ( $p < 0.05$ ).

**Keywords:** antibiotics, urease activity, sod-podzolic soil, gray forest soil.

Антибиотики широко используются в медицине, ветеринарии и сельском хозяйстве для лечения и профилактики заболеваний, стимулирования роста и продуктивности животных. До 90% вводимых в организм антибактериальных препаратов выделяются с экскрементами, поступая в почвы вследствие применения навоза, сточных муниципальных вод и их осадков для удобрения и орошения сельскохозяйственных земель [1–3]. Концентрации антибиотиков в наземных экосистемах варьируются от нескольких нг/кг до сотен мг/кг и зависят от свойств и продолжительности использования [1–5].

При попадании в окружающую среду антибиотики способны оказывать воздействие на микробные сообщества экосистем благодаря своим бактерицидным и бактериостатическим свойствам. К настоящему времени исследовано воздействие антибактериальных препаратов различных групп на структурное, функциональное, генетическое разнообразие и обилие почвенных микроорганизмов (МО), а также на осуществляемые ими процессы [2–13].

В связи с тем, что ключевую роль в поддержании гомеостаза почвы играют ферментативные процессы, осуществляющие круговорот веществ и энергии и определяющие её биологическую активность, активность ферментов используется в диагностике состояния и экологическом мониторинге почв, является важным биоиндикатором реакции МО на воздействие антибиотиков [2, 14]. Наибольшее значение для исследований представляют ферменты классов гидролаз и оксидоредуктаз, особенно связанные с циклами углерода и азота [14].

Уреаза (карбамид-аминогидролаза) – фермент, участвующий в цикле азота, расщепляющий связи между углеродом и азотом мочевины с образованием аммиака и углекислого газа, а также предотвращающий изомеризацию карбамида в цианат аммония, токсичный для растений. Мочевина поступает в почву в составе азотных удобрений, навоза, растительных остатков и образуется в процессе биохимических превращений. Аммиак, в свою очередь, является источником азотного

питания растений и МО. Активность уреазы служит диагностическим показателем способности почвы накапливать минеральный азот. Высокая активность фермента может приводить к повышению реакции почвенной среды из-за накопления ионов аммония, следствием чего являются потери азота в составе аммиака [14, 15]. Уровень уреазной активности и распределение по профилю зависят от генетических особенностей почвы, её химических и физических свойств, механической обработки [14].

В настоящее время опубликованы исследования о влиянии антибиотиков окситетрациклина, хлортетрациклина, сульфамида, сульфаметазина, сульфадиазина, смеси сульфаниламидных антибиотиков (сульфадиметоксина, сульфаметоксазола, сульфаметазина), тилозина и ампициллина на уреазную активность различных почв [6–12]. Показано, что изменения активности уреазы в почвах, обработанных окситетрациклином, соответствовали изменению микробной биомассы. Культивируемые растения снижали токсический эффект антибиотиков [6]. Повышение уреазной активности при обработке антибиотиками демонстрировало возможность почвенной микрофлоры использовать внесённые препараты в качестве источника углерода [8]. Установлено, что растворённое органическое вещество навоза и хлортетрациклин оказывали противоположное воздействие на уреазную активность почвы: органическое вещество стимулировало активность фермента, добавление антибиотика ингибировало его [7]. Более устойчивой к воздействию сульфаметазина оказалась почва, имеющая более высокую уреазную активность, величину pH, содержание органического углерода и азота, численность МО [9]. Добавление сульфаниламидов ингибировало уреазную активность почв [11].

В ранее опубликованных нами работах установлено токсическое воздействие тилозина, ампициллина и их смеси на уреазную активность дерново-подзолистой супесчаной слабокультуренной почвы в модельном лабораторном эксперименте [12], а также бензилпенициллина (концентрация 200 мг/кг),

окситетрациклина, тилозина на уреазную активность дерново-подзолистой легкосуглинистой пахотной почвы [13].

Целью данной работы являлось изучение и сравнение воздействия антибиотических препаратов разных групп (тилозина, окситетрациклина, бензилпенициллина) в широком диапазоне концентраций (50–700 мг/кг) на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной суглинистых почв методом модельных лабораторных исследований.

Актуальность работы обусловлена тем, что изменение активности уреазы при загрязнении антибиотиками может быть причиной нарушения азотного цикла почвы и может привести к потере плодородия основных пахотных почв Владимирской области – дерново-подзолистых и серых лесных.

**Объекты и методы исследования**

Объектами исследования являлись суглинистые дерново-подзолистая (Umbric Albeluvisols Abruptic) (56°4,783'N, 40°34,850'E) и серая лесная (Greyic Phaeozems Albic) (56°25,83'N, 40°23,17'E) почвы [16], образцы которых отобраны в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 на сельскохозяйственных участках во Владимирской области. Выбор типов почв обусловлен преобладанием их на сельскохозяйственных угодьях во Владимирской,

а также в соседних Ивановской и Ярославской областях. В целом на пашне Верхневолжского региона на них приходится 305 тыс. га [14]. Поскольку наиболее высокие значения активности изучаемого фермента были выявлены в гумусовом горизонте [14], образцы отбирали из верхнего слоя почвы с глубины 0–20 см.

В качестве поллютантов использовали антибиотики различных групп, отличающиеся по спектру воздействия и физико-химическим характеристикам.

Тилозин, относящийся к группе макролидов, подавляет развитие грамположительных и некоторых грамотрицательных бактерий, оказывая бактериостатическое действие, способен проявлять бактерицидные свойства в высоких концентрациях [17]. В эксперименте тилозин применялся в лекарственной форме раствора для инъекций с концентрацией действующего вещества 200 мг/см<sup>3</sup>. Окситетрациклин, относящийся к группе тетрациклиновых антибиотиков, имеет широкий спектр действия против грамположительных и грамотрицательных бактерий, проявляет бактериостатическое действие, при увеличении концентрации способен оказывать и бактерицидное действие. Бензилпенициллин, относящийся к группе β-лактамовых антибиотиков, эффективен против грамположительных организмов, проявляя бактерицидные и бактериостатические

**Таблица 1 / Table 1**

Агрохимические показатели исследуемых почв  
Agrochemical indicators of the studied soils

| Показатели, единица измерения<br>Indicators, unit of measurement             | Значения показателей<br>Values of indicators   |  | Методика исследования<br>Method of determination |
|--|--|--|--|
|  | дерново-подзолистая почва<br>sod-podzolic soil | серая лесная почва<br>gray forest soil |  |
| Кислотность солевой вытяжки, pH <sub>KCl</sub><br>Acidity, pH <sub>KCl</sub> | 5,6±0,2  | 6,8±0,2                                | ГОСТ 26483-85<br>GOST 26483-85                   |
| Органическое вещество (гумус), %<br>Organic matter, %                        | 2,4±0,5  | 4,0±0,6                                | ГОСТ 26213-91<br>GOST 26213-91                   |
| Азот аммиачный, мг/кг<br>N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , mg/kg              | 0,0  | 0,48±0,07                              | ГОСТ 26489-85<br>GOST 26489-85                   |
| Азот нитратный, мг/кг<br>N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/kg              | 10,1±1,5                                       | 2,4±0,7                                | ГОСТ 26951-86<br>GOST 26951-86                   |
| Содержание физической глины, %<br>Physical clay, %                           | 30,2±3,0                                       | 35,5±3,6                               | ГОСТ 12536-2014<br>GOST 12536-2014               |

свойства [17]. Используемые препараты окситетрациклина гидрохлорид и бензилпенициллина натриевая соль представляли собой порошки для приготовления инъекционного раствора в количестве 1 г, содержащие 1000000 ЕД активного вещества. Рабочие растворы антибиотиков для исследования готовили путём разбавления исходных препаратов в дистиллированной воде. В эксперименте использовали концентрации антибиотиков в дозах, соответствующих 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 мг/кг почвы, выбранные на основании литературных данных [4–5].

Уреазную активность почвы определяли фотоколориметрическим методом по учёту количества аммиака, образующегося при гидролизе вносимой мочевины [15]. Контролем служила почва, стерилизованная в течение 3 ч при 180 °С и субстрат без почвы (3% раствор мочевины). Количество аммиака рассчитывали по предварительно составленной калибровочной кривой. Активность уреазы рассчитывали по формуле:

$$A = \frac{(a - b) \cdot p \cdot 10}{n}$$

где *A* – активность уреазы, мг NH<sub>3</sub>/10 г почвы; *a* – количество аммиака в пробе по графику, мг; *b* – количество аммиака в контроле по графику, мг; *n* – навеска воздушно-сухой почвы, г; *p* – разведение [15].

Опыты проводили в трёх повторностях для каждой концентрации антибиотика.

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием программы Statistica 7.0. Был проведён корреляционный анализ зависимости показателя уреазной активности почвы от концентрации антибиотика (*p* < 0,05), рассчитан коэффициент корреляции Пирсона. В качестве погрешности указаны значения стандартной ошибки среднего. Построение графиков осуществляли в программе Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

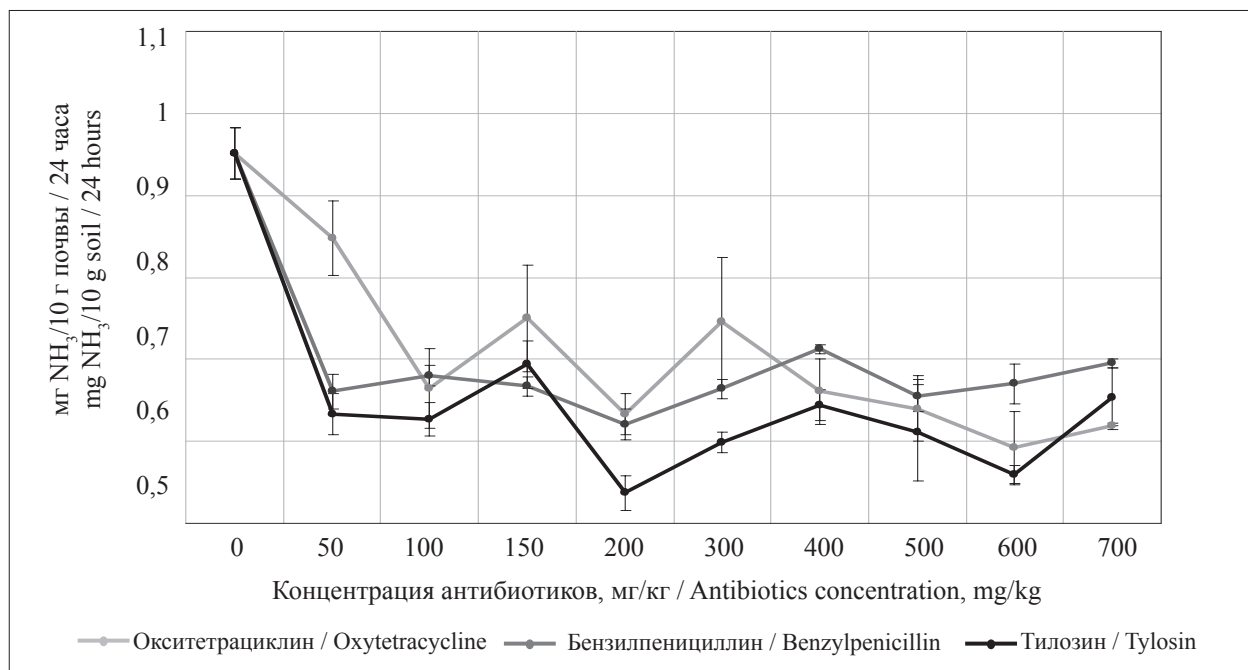
Установлено, что уреазная активность дерново-подзолистой почвы без внесения антибиотиков составляла 0,951 г NH<sub>3</sub>/10 г почвы за 24 ч, серой лесной – 1,178 г NH<sub>3</sub>/10 г почвы за 24 ч, что характеризует обе исследуемые почвы как очень бедные по степени обогащённости уреазой [18].

Результаты корреляционного анализа зависимости уреазной активности дерново-подзолистой и серой лесной почв от концентрации антибиотиков представлены в таблице 2.

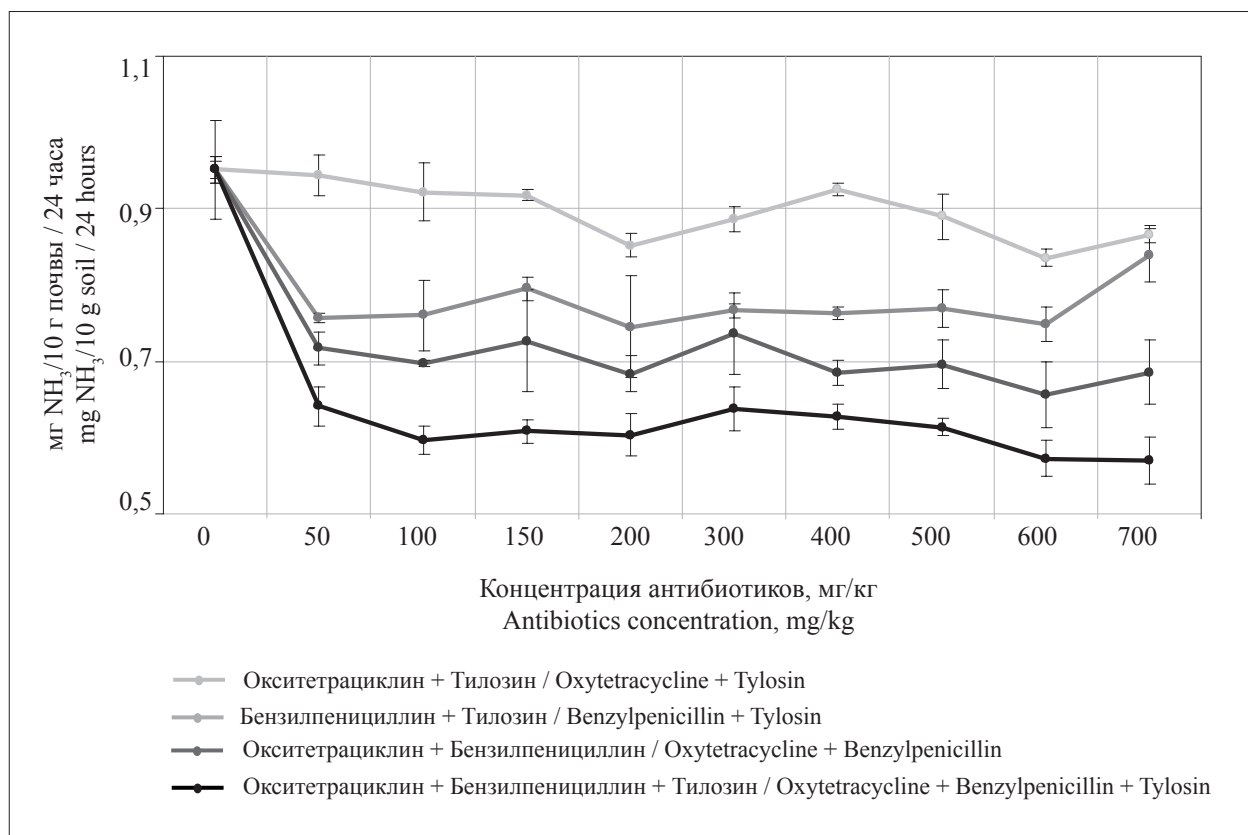
Полученные результаты демонстрируют уменьшение уреазной активности дерново-подзолистой почвы при внесении антибиотиков. Наибольшее снижение наблюдалось при воздействии тройной смеси антибактериальных препаратов, наименьшее – при внесении смеси окситетрациклина и тилозина (рис. 1, 2). Установлены достоверные отрицательные корреляционные зависимости активности

Таблица 2 / Table 2  
Результаты корреляционного анализа зависимости уреазной активности почв от концентрации антибиотиков / Results of the correlation analysis of the dependence of the urease activity of soils on the concentration of antibiotics

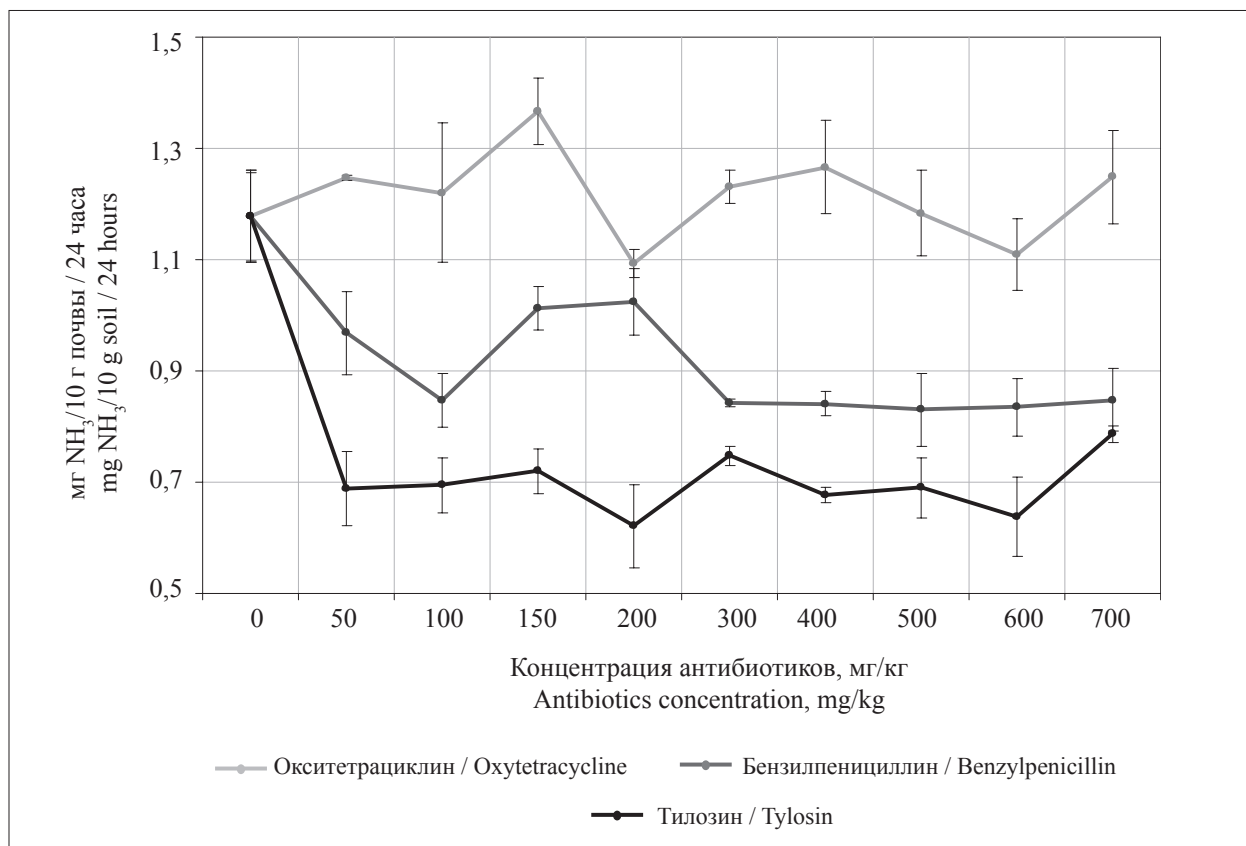
| Антибиотики<br>Antibiotics   | Коэффициент корреляции Пирсона ( <i>r</i> )<br>и критерия значимости ( <i>p</i> )<br>Pearson correlation coefficient ( <i>r</i> ),<br>significance criteria value ( <i>p</i> ) |                                       |
|--|--|---------------------------------------|
|  | дерново-подзолистая почва / sod-podzolic soil  | серая лесная почва / gray forest soil |
| Бензилпенициллин / Benzylpenicillin  | <i>r</i> = -0,3337; <i>p</i> = 0,346   | <i>r</i> = -0,6983; <i>p</i> = 0,025  |
| Окситетрациклин / Oxytetracycline  | <i>r</i> = -0,7525; <i>p</i> = 0,012   | <i>r</i> = -0,1625; <i>p</i> = 0,654  |
| Тилозин / Tylosin  | <i>r</i> = -0,4443; <i>p</i> = 0,198   | <i>r</i> = -0,3536; <i>p</i> = 0,316  |
| Окситетрациклин + Бензилпенициллин<br>Oxytetracycline + Benzylpenicillin                     | <i>r</i> = -0,5670; <i>p</i> = 0,087   | <i>r</i> = -0,1594; <i>p</i> = 0,660  |
| Бензилпенициллин + Тилозин<br>Benzylpenicillin + Tylosin                                     | <i>r</i> = -0,2160; <i>p</i> = 0,549   | <i>r</i> = -0,0798; <i>p</i> = 0,827  |
| Окситетрациклин + Тилозин<br>Oxytetracycline + Tylosin                                       | <i>r</i> = -0,7124; <i>p</i> = 0,021   | <i>r</i> = -0,7240; <i>p</i> = 0,018  |
| Окситетрациклин + Бензилпенициллин + Тилозин<br>Oxytetracycline + Benzylpenicillin + Tylosin | <i>r</i> = -0,5432; <i>p</i> = 0,105   | <i>r</i> = -0,0673; <i>p</i> = 0,853  |



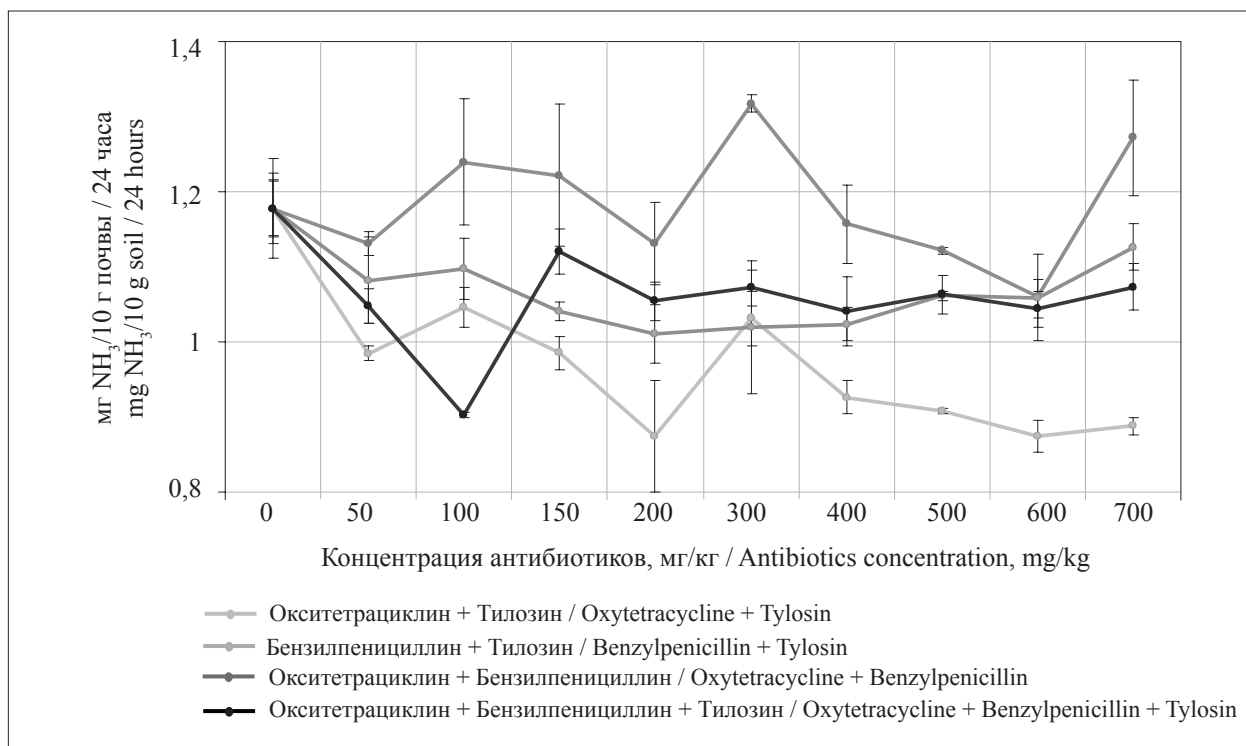
**Рис. 1.** Зависимость уреазной активности дерново-подзолистой почвы от концентрации внесённых антибиотиков при индивидуальном воздействии  
**Fig. 1.** Dependence of the urease activity of the sod-podzolic soil on the concentration of introduced antibiotics under individual exposure



**Рис. 2.** Зависимость уреазной активности дерново-подзолистой почвы от концентрации внесённых антибиотиков при комбинированном воздействии  
**Fig. 2.** Dependence of the urease activity of the sod-podzolic soil on the concentration of introduced antibiotics under combined exposure



**Рис. 3.** Зависимость уреазной активности серой лесной почвы от концентрации внесённых антибиотиков при индивидуальном воздействии  
**Fig. 3.** Dependence of the urease activity of the gray forest soil on the concentration of introduced antibiotics under individual exposure



**Рис. 4.** Зависимость уреазной активности серой лесной почвы от концентрации внесённых антибиотиков при комбинированном воздействии  
**Fig. 4.** Dependence of the urease activity of the gray forest soil on the concentration of introduced antibiotics under combined exposure

фермента от концентрации окситетрациклина и его смеси с тилозином (табл. 2).

Выявлено снижение уреазной активности серой лесной почвы при загрязнении бензилпенициллином, тилозином, смесями окситетрациклина с тилозином, окситетрациклина с бензилпенициллином и тройной комбинации препаратов. Окситетрациклин, а также смесь бензилпенициллина с тилозином проявляли незначительное, как стимулирующее, так и ингибирующее воздействие в зависимости от применяемой концентрации (рис. 3, 4). Наибольшее токсическое влияние проявлялось при внесении тилозина, однако оно не являлось дозозависимым (табл. 2). Достоверная отрицательная корреляционная зависимость уреазной активности от концентрации препарата была установлена для бензилпенициллина и смеси окситетрациклина с тилозином (табл. 2).

Установленная уреазная активность серой лесной почвы превышает данный показатель дерново-подзолистой почвы, что может быть связано с более высоким содержанием аммонийного азота (табл. 1), и, как следствие, с большим количеством почвенных МО, осуществляющих процесс разложения карбамида [14].

Результаты исследования демонстрируют преимущественно ингибирующее воздействие антибиотиков на уреазную активность дерново-подзолистой и серой лесной почв, что совпадает с опубликованными данными [6–13]. Согласно ранее проведённым исследованиям структуры микробиома дерново-подзолистой почвы, загрязнённой 200 мг/кг бензилпенициллина, окситетрациклина и тилозина, ингибирование уреазной активности может быть связано с изменением содержания архей семейства Nitrososphaeraceae, которые способны использовать мочевины в качестве субстрата [13, 19].

Незначительное повышение активности уреазы серой лесной почвы при загрязнении окситетрациклином и смесью бензилпенициллина с тилозином соответствует литературным данным [6, 8] и может быть связано с возможностью почвенной микрофлоры использовать внесённые препараты в качестве источника углерода [8].

Наиболее сильное токсическое влияние на уреазную активность дерново-подзолистой почвы оказала тройная смесь, серой лесной – тилозин, однако эти воздействия не являлись дозозависимыми (табл. 2).

Достоверные отрицательные корреляционные зависимости значения активности

уреазы от концентрации препаратов были установлены для окситетрациклина при добавлении к дерново-подзолистой почве, бензилпенициллина – к серой лесной, смеси окситетрациклина и тилозина – к обоим исследуемым почвам.

Сравнение результатов воздействия антибиотиков на исследуемые дерново-подзолистую и серую лесную почвы демонстрирует различный ответ на влияние препаратов. Уреазная активность серой лесной почвы выше и менее подвержена воздействию вносимых препаратов, что может быть связано с более высокими значениями pH, содержанием органического углерода и аммиачного азота (табл. 1) и соответствует литературным данным [9].

Ингибирование активности уреазы может привести к снижению содержания минерального азота, увеличению концентрации фитотоксичного цианата аммония, а повышение – к потерям азота из почвы в составе аммиака [14], поэтому результаты данного исследования имеют важное теоретическое и практическое значение.

## Заключение

Впервые изучено влияние антибиотиков тилозина, окситетрациклина, бензилпенициллина в широком диапазоне концентраций (50–700 мг/кг почвы) на уреазную активность суглинистых дерново-подзолистой и серой лесной почв, как при индивидуальном, так и при комбинированном воздействии.

Результаты исследования демонстрируют преимущественно токсическое воздействие антибиотиков на уреазную активность исследуемых почв.

Наибольшее токсическое влияние на уреазную активность дерново-подзолистой почвы оказала тройная смесь антибиотиков, серой лесной – тилозин, однако эти воздействия не являлись дозозависимыми.

Установлены достоверные отрицательные корреляционные зависимости активности уреазы в дерново-подзолистой почве от концентрации окситетрациклина и его смеси с тилозином, в серой лесной – от концентрации бензилпенициллина и смеси окситетрациклина с тилозином.

Ингибирование активности уреазы может привести к снижению содержания минерального азота, увеличению концентрации фитотоксичного цианата аммония, а повышение – к потерям азота из почвы в составе аммиака.

Воздействие антибактериальных препаратов зависит от их свойств и концентраций, а также от типа и свойств почв. Уреазная активность серой лесной почвы выше, чем дерново-подзолистой, и является более устойчивой к воздействию антибиотиков.

### References

- Grenni P., Ancona V., Caracciolo A.B. Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review // *Microchemical Journal*. 2018. V. 136. P. 25–39. doi: 10.1016/j.microc.2017.02.006
- Cycoń M., Mroziak A., Piotrowska-Seget Z. Antibiotics in the soil environment – degradation and their impact on microbial activity and diversity // *Front. Microbiol.* 2019. V. 10. Article No. 338. doi: 10.3389/fmicb.2019.00338
- Van de Vijver L., Verwer C., Smolders G., Hospers-Brands M., van Eekeren N. The cycle of veterinary antibiotics in the ecosystem. Louis Bolk Institute, 2016. 31 p.
- Akimenko Y.V., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. Influence of pollution by antibiotics on the biological properties of ordinary chernozem: monograph. Rostov-na-Donu: Southern Federal University Publ., 2015. 153 p. (in Russian).
- Akimenko Y.V., Chuvaraeva O.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Minnikova T.V. Assessment of the ecological state of the main soils of the south of Russia under conditions of antibiotic contamination: monograph. Rostov-na-Donu, Taganrog: Southern Federal University Publ., 2019. 114 p. (in Russian).
- Chen W., Liu W., Pan N., Jiao W., Wang M. Oxytetracycline on functions and structure of soil microbial community // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2013. V. 13. No. 4. P. 967–975. doi: 10.4067/S0718-95162013005000076
- Liu B., Li Y., Zhang X., Wang J., Gao M. Combined effects of chlortetracycline and dissolved organic matter extracted from pig manure on the functional diversity of soil microbial community // *Soil Biology and Biochemistry*. 2014. V. 74. P. 148–155. doi: 10.1016/j.soilbio.2014.03.005
- Molaei A., Lakzian A., Datta R., Haghnia G., Astaraei A., Rasouli-Sadaghiani M., Ceccherini M.T. Impact of chlortetracycline and sulfapyridine antibiotics on soil enzyme activities // *Int. Agrophys.* 2017. V. 31. P. 499–505. doi: 10.1515/intag-2016-0084
- Pinna M.V., Castaldi P., Deiana P., Pusino A., Garau G. Sorption behavior of sulfamethazine on unamended and manure-amended soils and short-term impact on soil microbial community // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012. V. 84. P. 234–242. doi: 10.1016/j.ecoenv.2012.07.006
- Hammesfahr U., Bierl R., Thiele-Bruhn S. Combined effects of the antibiotic sulfadiazine and liquid manure on the soil microbial-community structure and functions // *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2011. V. 174. No. 4. P. 614–623. doi: 10.1002/jpln.201000322
- Gutiérrez I.R., Watanabe N., Harter T., Glaser B., Radke M. Effect of sulfonamide antibiotics on microbial diversity and activity in a Californian Mollic Haploxeralf // *Journal of Soils and Sediments*. 2010. V. 10. P. 537–544. doi: 10.1007/s11368-009-0168-8
- Trifonova T.A., Chesnokova S.M., Kosmacheva A.G. Evaluation of the effect of ampicillin and tylosin antibiotics on the enzymatic activity of sod-podzolic soil and their toxicity to cultivated plants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 2. P. 150–156 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-2-150-156
- Trifonova T., Kosmacheva A., Sprygin A., Chesnokova S., Byadovskaya O. Enzymatic activity and microbial diversity of sod-podzolic soil microbiota using 16S rRNA amplicon sequencing following antibiotic exposure // *Antibiotics*. 2021. V. 10. Article No. 970. doi: 10.3390/antibiotics10080970
- Zinchenko M.K. Enzymatic processes in the gray forest soils of the Upper Volga: monograph. Ivanovo: PreSsto Publ., 2019. 140 p. (in Russian).
- Kazeev K., Kolesnikov S., Valkov V. Biological diagnostic and indication of soils: the methodology and methods of researches. Rostov-na-Donu: RGU Publ., 2003. 216 p. (in Russian).
- IUSS Working Group WRB. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2018. 216 p.
- USP Veterinary Pharmaceutical Information Monographs – Antibiotics. Blackwell Publishing // *J. Vet. Pharmacol. Ther.* 2003. V. 26. No. s2. 280 p. doi: 10.1034/j.1600-051x.26.s2.1.x
- Zvyagintsev D.G. Biological activity of soils and some scales for its evaluation // *Soviet Soil Science*. 1978. No. 6. P. 48–54 (in Russian).
- Yang Y., Herbold C.W., Jung M.-Y., Qin W., Cai M., Du H., Lin J.-G., Li X., Li M., Gu J.-D. Survival strategies of ammonia-oxidizing archaea (AOA) in a full-scale WWTP treating mixed landfill leachate containing copper ions and operating at low-intensity of aeration // *Water Research*. 2021. V. 191. Article No. 116798. doi: 10.1016/j.watres.2020.116798