

УДК 628.36:631.416.1:631.445.41

ВЛИЯНИЕ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В СОЧЕТАНИИ С РАЗЛИЧНЫМИ ДОБАВКАМИ НА АЗОТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО

© 2023 г. И. М. Габбасова¹, Т. Т. Гарипов¹, Е. С. Дорогая¹,
М. А. Комиссаров^{1,*}, Ф. И. Назырова¹, А. С. Нигматзянов²

¹Уфимский институт биологии УФИЦ РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

²Башкирский государственный аграрный университет
450001 Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, Россия

*E-mail: mkomissarov@list.ru

Поступила в редакцию 08.04.2023 г.

После доработки 13.05.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В 3-месячном модельном опыте изучено влияние внесения осадков сточных вод (*ОСВ*) в дозах 40 и 80 г/сосуд, что в пересчете на сухой вес соответствует 5 и 10 т/га в сочетании с соломой, кизельгуром и сапропелем на азотное состояние чернозема выщелоченного слабоэродированного. Показано, что добавление к *ОСВ* кизельгура и сапропеля, в отличие от соломы, способствовало улучшению показателей азотного состояния почвы. Повышение дозы *ОСВ* приводило к достоверному увеличению содержания щелочногидролизуемого азота. При компостировании добавок с *ОСВ* обогащение почвы минеральным азотом можно расположить в следующий убывающий ряд: кизельгур суспендированный > кизельгур сухой > сапропель > *ОСВ* без добавок > солома. Воздействие двойной дозы *ОСВ* на содержание общего и минерального азота, гумусированность и pH почвы существенно не отличалось от одинарной дозы. Использование высоких доз *ОСВ* целесообразно с точки зрения утилизации отходов.

Ключевые слова: азотное состояние почвы, кизельгур, осадки сточных вод, сапропель, солома.

DOI: 10.31857/S0002188123110054, **EDN:** PPGLZR

ВВЕДЕНИЕ

Среди элементов питания растений особую роль играет азот. Наряду с использованием минеральных и органических удобрений его альтернативным источником могут быть азотсодержащие отходы, нуждающиеся в утилизации. Одними из постоянно увеличивающихся в объемах отходов мегаполисов являются осадки сточных вод (*ОСВ*). В РФ накапливается порядка 2.5 млн т в пересчете на сухое вещество ежегодно [1]. Содержание общего азота в составе *ОСВ* в зависимости от технологии обработки, сезона, климатической зоны, изменяется в диапазоне 1–5% [2–6]. Использование *ОСВ* в качестве удобрения регламентируется несколькими нормативными документами: СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”, ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 “Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений”, ГОСТ Р 54651-2011 “Удобре-

ния органические на основе осадков сточных вод” и ГОСТ Р 59748-2021 “Технические принципы обработки осадков сточных вод. Общие требования”. *ОСВ* можно использовать в качестве основы органических удобрений в зависимости от их методов обработки, состава и свойств. Прошедшие обработку — могут классифицироваться как “побочная продукция” и предназначаться для использования в качестве органических, органоминеральных и органо-известковых удобрений, почвогрунтов (растительных грунтов), рекультивантов, изолирующего материала, биотоплива и т.п. Многие авторы отмечают, что эффективность *ОСВ* сопоставима с навозом [7–9], а в некоторых случаях *ОСВ* результативнее традиционных удобрений, особенно на малогумусных почвах [2]. Помимо удобрительного эффекта, *ОСВ* способны сорбировать и удерживать воду, что актуально для территорий с аридным климатом [10]. Целесообразно добавлять к *ОСВ* материалы (листья, древесную кору, опилки, торф и др.), допол-

Таблица 1. Схема опыта

Вариант	Внесено в сосуд, г/кг почвы	Краткое название варианта
Контроль	—	К
<i>ОСВ</i> 5 т/га (в пересчете на сухой вес) — 1 доза	40 г <i>ОСВ</i>	<i>ОСВ</i> (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га (в пересчете на сухой вес) — 2 дозы	80 г <i>ОСВ</i>	<i>ОСВ</i> (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + солома 0.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 4 г соломы	<i>ОСВ</i> + сол (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + солома 1 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 8 г соломы	<i>ОСВ</i> + сол (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + сапропель 2.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 20 г сапропеля	<i>ОСВ</i> + сап (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + сапропель 5 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 40 г сапропеля	<i>ОСВ</i> + сап (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + кизельгур сухой 7.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 60 г кс	<i>ОСВ</i> + кс (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + кизельгур сухой 15 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 120 г кс	<i>ОСВ</i> + кс (2)
<i>ОСВ</i> 5 т/га + кизельгур жидкий (суспендированный) 7.5 т/га	40 г <i>ОСВ</i> + 280 мл кж	<i>ОСВ</i> + кж (1)
<i>ОСВ</i> 10 т/га + кизельгур жидкий 15 т/га	80 г <i>ОСВ</i> + 560 мл кж	<i>ОСВ</i> + кж (2)

Примечание. Обозначения вариантов те же в табл. 2.

нительно улучшающие как питательные, так и физические свойства полученного мелиоранта, что особенно актуально для почв, подверженных эрозии. Эффективность использования различных добавок для повышения плодородия и снижения эродированности черноземов в Южном Предуралье показана ранее [11–13]. Изучен состав *ОСВ* с очистных сооружений региона и предложена технология по снижению концентрации тяжелых металлов в них [14], но воздействие *ОСВ* на свойства почв Предуралья мало изучено. В связи с этим целью работы было изучение влияния внесения *ОСВ* в сочетании с различными добавками (соломой, кизельгуром и сапропелем) на азотное состояние чернозема выщелоченного слабоэродированного.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования был использован чернозем выщелоченный, легкоголистый, слабоэродированный Южной лесостепи Республики Башкортостан. Эта почва характеризуется средней мощностью гумусово-аккумулятивных горизонтов, средней гумусированностью, слабокислой реакцией среды. Для проведения модельного опыта использовали почву из пахотного горизонта (0–20 см). *ОСВ* были взяты с городских очистных сооружений после окончания технологического цикла их обработки. Добавками служили органические субстраты: измельченная пшеничная солома, кизельгур (отход пивного производства) в виде суспензии и порошка, сапропель из осушенного болота.

Аналитические исследования проводили в соответствии с общепринятыми методами [15]. Валовой

азот определяли по Кьельдалю, щелочногидролизуемый — по Корнфилду, нитратный — колориметрическим методом с дисульфифеноловой кислотой, аммонийный — колориметрическим методом с реактивом Несслера, содержание органического углерода — по Тюрину. Модельный опыт был заложен по схеме, представленной в табл. 1. 1 кг сухой почвы, просеянной через сито с диаметром отверстий 3 мм, помещали в пластиковые контейнеры емкостью 2 л. Наполнители также измельчали, просеивали и вносили в почву в сухом виде, тщательно перемешивали и затем периодически добавляли воду. Жидкий кизельгур вносили по объему с учетом его влажности. Опыт проводили в 3-кратной повторности в течение 12 нед при постоянной температуре (20°C) и влажности (~60% ПВ) субстрата. Отбор образцов для определения минеральных форм азота производили каждые 2 нед. Содержание гумуса, общего и щелочногидролизуемого азота, актуальную и обменную кислотность определяли по завершению опыта. Результаты обрабатывали методами математической статистики с помощью программы MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внесение в почву *ОСВ* совместно со всеми использованными добавками способствовало увеличению содержания минерального азота. В начале опыта самое высокое содержание N-NH₄ в почве было при внесении жидкого кизельгура (50.6 и 83.8 мг/кг почвы в зависимости от дозы), но в дальнейшем оно резко снизилось. Содержание аммония в остальных вариантах вначале было на порядок меньше (рис. 1) и последовательно

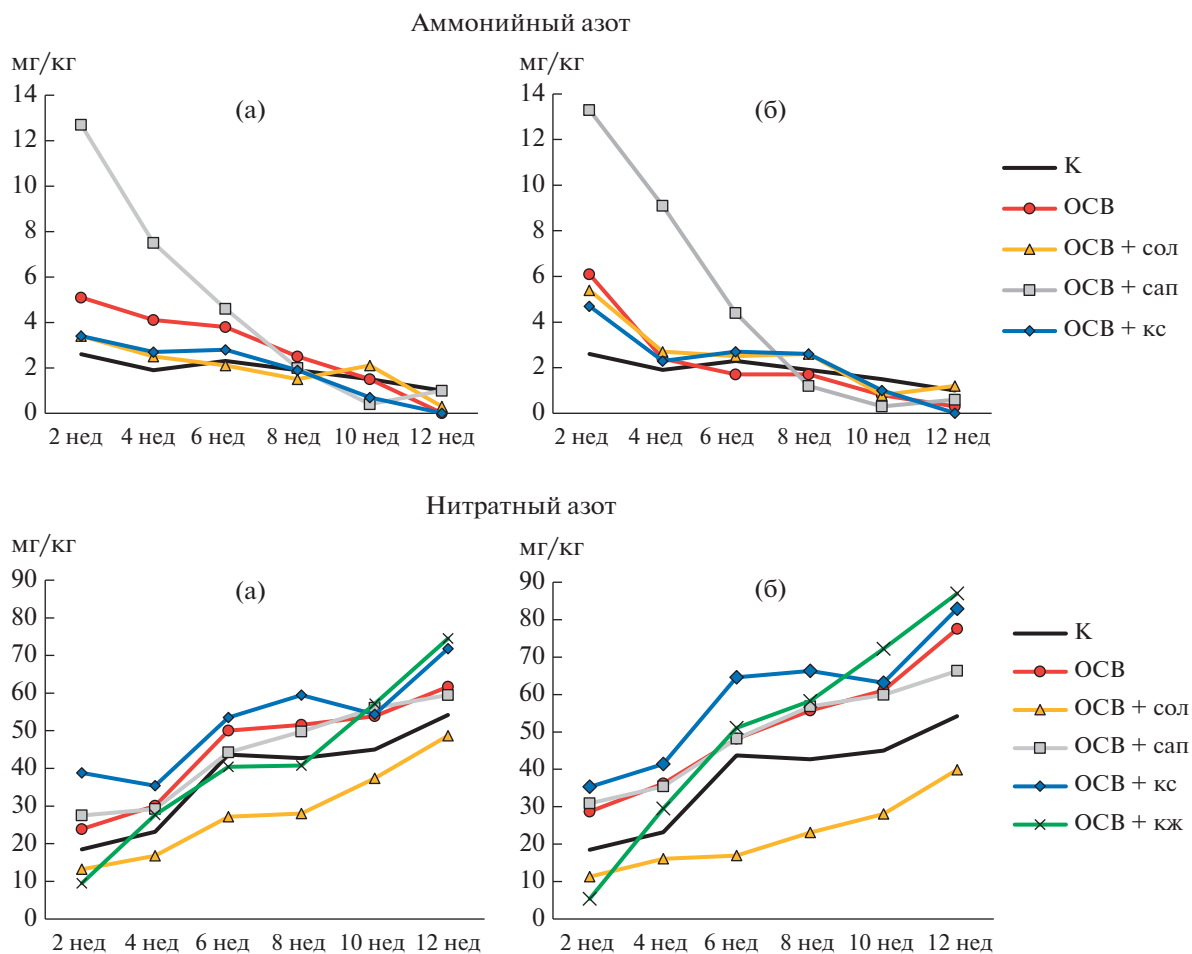


Рис. 1. Динамика содержания аммонийного и нитратного азота в почве: (а) — одинарная доза, (б) — двойная доза *OCB*.

снижалось в процессе компостирования. Вне зависимости от дозы *OCB* и вида добавок содержание $N-NH_4$ выравнивалось и приближалось к контрольному варианту через 6 нед. Очевидно, что наряду с газообразными потерями это было связано с развитием процесса нитрификации в окислительных условиях опыта.

Содержание нитратной формы азота в начале опыта было значительно больше аммонийной (кроме варианта с жидким кизельгуром). При этом необходимо отметить, что в этом варианте (*OCB* + кж), а также при добавлении соломы, содержание $N-NO_3$ было меньше, чем в контроле. В процессе компостирования оно постепенно возрастало. В целом динамика содержания минеральных форм азота соответствовала их изменению в полевых условиях при внесении помета с растительными остатками в слабоэродированный чернозем [16].

При внесении двойных доз в вариантах *OCB*, *OCB* + сап и *OCB* + кс содержание минерального

азота в почве было на 11–13% больше, чем при одинарных дозах. В варианте *OCB* + кж превышение составило 31%, в основном за счет высокого содержания $N-NH_4$ в первые 2 нед компостирования. Добавление соломы через 2.5 мес. опыта привело к снижению содержания минерального азота на 28% по сравнению с контролем, при двойной дозе оно было меньше, чем при одинарной дозе на 18%. Вероятно, это было обусловлено тем, что с соломой, обедненной азотом, особенно с ее двойной дозой, вносили много относительно трудноразлагаемых соединений (целлюлозы, клетчатки, лигнина и др.). Очевидно, для разложения и минерализации соломы срок компостирования, равный 12 нед, недостаточен, что видно по ее сохранившемуся анатомическому строению. Об этом свидетельствовало также самое низкое содержание общего азота и самое широкое соотношение $C : N$ в этих вариантах (табл. 2). При общей средней обогащенности азотом почва варианта *OCB* + сол (2) относится к категории “низкая”.

Таблица 2. Агрохимические свойства почвы при внесении *ОСВ* с разными добавками

Вариант	Гумус, %	pH _{KCl}	N _{общ} , %	N _{щел} , мг/кг	C : N
К	6.1 ± 0.1	5.5 ± 0.1	0.35 ± 0.03	152 ± 4	10.1
<i>ОСВ</i> (1)	6.4 ± 0.2	5.8 ± 0.1	0.37 ± 0.02	160 ± 3	10.0
<i>ОСВ</i> (2)	7.0 ± 0.3	6.0 ± 0.2	0.40 ± 0.03	169 ± 3	10.2
<i>ОСВ</i> + сол (1)	6.7 ± 0.1	5.9 ± 0.1	0.38 ± 0.01	155 ± 2	10.2
<i>ОСВ</i> + сол (2)	7.0 ± 0.2	6.1 ± 0.1	0.32 ± 0.02	158 ± 3	12.7
<i>ОСВ</i> + сап (1)	7.3 ± 0.2	6.6 ± 0.1	0.44 ± 0.02	175 ± 3	9.6
<i>ОСВ</i> + сап (2)	7.8 ± 0.3	6.7 ± 0.2	0.48 ± 0.02	184 ± 2	9.4
<i>ОСВ</i> + кс (1)	6.8 ± 0.2	5.7 ± 0.1	0.38 ± 0.01	168 ± 2	10.4
<i>ОСВ</i> + кс (2)	6.6 ± 0.2	5.9 ± 0.1	0.38 ± 0.01	174 ± 1	10.1
<i>ОСВ</i> + кж (1)	6.5 ± 0.2	5.2 ± 0.2	0.42 ± 0.03	181 ± 4	9.0
<i>ОСВ</i> + кж (2)	6.6 ± 0.1	5.3 ± 0.3	0.45 ± 0.02	186 ± 2	9.4

Примечание. ± — стандартная ошибка.

Основная масса почвенного азота входит в состав органических соединений гумуса. Внесение в чернозем выщелоченный *ОСВ* способствовало повышению его гумусированности через 12 нед компостирования. В полевом опыте на дерново-подзолистой почве содержание гумуса заметно возрастало лишь при внесении очень высоких доз *ОСВ* [17], и суммарное накопление минерального азота в почве изменялось пропорционально дозе *ОСВ* (180–1440 т/га) с превышением относительно контроля на 8.5–61.7% [18]. На фоне небольшого увеличения содержания гумуса при внесении *ОСВ* наиболее эффективным было добавление сапропеля, наименее — жидкого кизельгура. В почве этих же вариантов наблюдали максимальное изменение кислотности: ее нейтрализация в первом и подкисление во втором случае, что было связано с реакцией среды добавленных материалов (рН сапропеля — 7.0, кизельгура — 4.3 ед.). Внесение компостов на основе *ОСВ* в серую лесную почву также приводило к снижению всех видов кислотности [19].

Содержание щелочногидролизующего азота — ближайшего резерва азотного питания растений — при внесении *ОСВ* в дозе 5 т/га увеличилось в среднем на 16 мг/кг, в дозе 10 т/га — 22 мг/кг. Использование жидкого кизельгура и сапропеля привело к дополнительному увеличению содержания щелочногидролизующего азота до 26 и 33 мг/кг соответственно. При внесении двойной дозы удобрений содержание щелочногидролизующего азота, в отличие от валовых форм гумуса и азота, было достоверно больше, чем при внесении одинарной ($t_{st} = 3.2$ при $p < 0.05$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесение осадков сточных вод (*ОСВ*) в чернозем выщелоченный слабоэродированный оказало заметное влияние на его азотное состояние. При этом увеличение дозы *ОСВ* с 5 до 10 т/га приводило к достоверному росту содержания щелочногидролизующего азота. Добавление к *ОСВ* кизельгура и сапропеля, в отличие от соломы, способствовало улучшению показателей азотного состояния почвы. По обогащенности почвы минеральным азотом варианты опыта можно расположить в следующий убывающий ряд: *ОСВ* + кизельгур жидкий > *ОСВ* + кизельгур сухой > *ОСВ* + сапропель > *ОСВ* > Контроль > > *ОСВ* + солома. Эффективность повышенной в 2 раза дозы *ОСВ* по влиянию на азотное состояние, гумусированность и кислотность почвы существенно не отличалась от одинарной дозы, но ее использование целесообразно с точки зрения утилизации отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варламова Л.Д., Короленко И.Д. Нетрадиционные удобрительные материалы в растениеводческом комплексе России и Нижегородской области // Агрохим. вестн. 2017. № 2. С. 15–20.
2. Лучицкая О.А., Севостьянов С.М. Воздействие осадков сточных вод на почву и растения // Агрохимия. 2007. № 9. С. 80–84.
3. Пахненко Е.П., Ермаков А.В., Убугунов Л.Л. Влияние осадков сточных вод города Улан-Удэ на свойства почвы, продуктивность и качество картофеля // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 4. С. 33–39.
4. Васбиева М.Т. Влияние длительного применения осадков сточных вод в качестве удобрения на продуктивность зернотравяного севооборота и каче-

- ство сельскохозяйственных культур // *Агрохимия*. 2016. № 1. С. 44–51.
5. Жигарева Ю.В., Мерзлая Г.Е. Агроэкологическая оценка эффективности осадков сточных вод на дерново-подзолистых почвах Тверской области // *Плодородие*. 2018. № 2. С. 49–51.
 6. Плеханова И.О. Степень самоочищения агродерново-подзолистых супесчаных почв, удобренных осадком сточных вод // *Почвоведение*. 2017. № 4. С. 506–512.
<https://doi.org/10.1134/S1064229317040081>
 7. Иванов А.И., Иванов И.А., Иванова Ж.А., Цыганова Н.А., Моисеев Д.А. Азотный режим легких дерново-подзолистых почв и пути его улучшения в современных условиях // *Агрохимия*. № 9. 2008. С. 5–15.
 8. Юмашев Н.П. Использование осадков сточных вод в качестве удобрений на выщелоченных черноземах Тамбовской области // *Агрохимия*. 2008. № 2. С. 57–65.
 9. Никитин С.Н., Завалин А.А. Влияние удобрений и биопрепаратов на продуктивность зернопарового севооборота, потоки элементов питания и свойства чернозема выщелоченного в лесостепи Среднего Поволжья // *Агрохимия*. 2017. № 6. С. 12–29.
 10. Межевова А.С., Берестнева Ю.В. Исследование особенностей структуры и свойств илового осадка с целью применения в качестве почвенного мелиоранта в земледелии аридных регионов // *Аридные экосистемы*. 2023. Т. 29. № 1 (94). С. 113–119.
<https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-1-113-119>
 11. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Галимзянова Н.Ф., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Гималетдинова Г.А. Использование удобрения на основе сплавнины для повышения плодородия эродированного чернозема типичного // *Агрохимия*. 2014. № 6. С. 35–42.
 12. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т., Комиссаров М.А., Сидорова Л.В., Галимзянова Н.Ф., Liebelt P., Абакумов Е.В., Гималетдинова Г.А., Простякова З.Г. Использование местных удобрений, почвенного гриба *Trichoderma koningii* oudem и no-till обработки для улучшения агрочернозема в Южном Предуралье // *Сел.-хоз. биол.* 2018. Т. 53. № 5. С. 1004–1012.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2018.5.1004rus>
 13. Komissarov M., Gabbasova I., Garipov T., Suleymanov R., Sidorova L. The Effect of phosphogypsum and turkey litter application on the properties of eroded agro-chnozem in the South Ural region (Russia) // *Agronomy*. 2022. V. 12. № 11. P. 2594.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12112594>
 14. Гаврилов М.М., Пименов А.А., Красников П.Е. Снижение содержания тяжелых металлов в осадках сточных вод при биодеструкции с добавлением гипса // *Природообустройство*. 2018. № 2. С. 108–114.
<https://doi.org/10.26897/1997-6011/2018-2-109-114>
 15. Агрохимические методы исследования почв / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
 16. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Простякова З.Г., Сулейманов Р.Р., Комиссаров М.А. Азотное состояние агрочернозема при внесении высоких доз куриного помета // *Экобиотехнология*. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–5.
<https://doi.org/10.31163/2618-964X-2018-1-1-1-5>
 17. Касатиков В.А., Шабардина Н.П., Раскатов В.А. Последствие повышенных доз осадка городских сточных вод на азотный режим, биологические показатели и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // *Плодородие*. 2019. № 6. С. 45–48.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.1>
 18. Касатиков В.А. Влияние мелиоративных доз осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность зерновых культур. *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 64–68.
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.111.1>
<https://doi.org/10.31857/S>
 19. Карякина С.Д., Карякин А.В., Касатиков В.А. Агроэкологическая эффективность аэробного компостирования осадков сточных вод при производстве органических удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2014. № 3. С. 14–18.

Impact of Sewage Sludges in Combination with Various Amendments on the Nitrogen State of Leached Chernozem

I. M. Gabbasova^a, T. T. Garipov^a, E. S. Dorogaya^a, M. A. Komissarov^{a, #},
F. I. Nazzyrova^a, and A. S. Nigmatzyanov^b

^aUfa Institute of Biology UFRS RAS, prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

^bBashkir State Agrarian University, ul. 50 Let Oktyabrya 34, Ufa 450001, Russia

[#]E-mail: mkomissarov@list.ru

In a 3 months model experiment, the effect of application of sewage sludge (SS) at doses of 40 and 80 g/vessel (in terms of dry mass corresponds to 5 and 10 t/ha) in combination with straw, kieselguhr and sapropel, on the nitrogen state of leached, slightly eroded chernozem, was studied. It is shown that the addition of kieselguhr and sapropel to SS, unlike of straw, improves the parameters of the soil nitrogen state. A raise of the SS dose leads to a significant increase of the alkaline hydrolysable nitrogen content. The ability of ameliorants with SS to enrich the soil by mineral nitrogen can be arranged in the following descending row: suspended kieselguhr > dry kieselguhr > sapropel > SS severally > straw. A double dose of SS does not differ significantly from a single dose in terms of its influence on the contents of total and mineral nitrogen, humification and soil acidity; the use of high doses of SS is rational for waste disposal.

Keywords: soil nitrogen status, kieselguhr, sewage sludge, sapropel, straw.