

*А.А. Утомбаева, А.М. Петров, Э.Р. Зайнулгабидинов, Т.В. Кузнецова,
А.А. Вершинин, Д.В. Иванов, Р.Р. Шагидуллин*

Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, semionova.alin@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛЯТА ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ

В двухэтапном эксперименте изучено влияние внесения термомеханически обработанного гранулированного осадка сточных вод МУП «Водоканал» г. Казани на характеристики серой лесной среднесуглинистой почвы и продуктивность смеси одно- и двудольных растений (рожь посевная и вика посевная). Показано, что в первые 6 недель инкубации внесение гранулята из расчета 10 т/га при выдерживании без растений и при культивировании растений приводит к повышению дыхательной активности почвы, способствует увеличению микробиологического разнообразия. Гранулят обогащает почву органическими и минеральными компонентами, а проходящие биохимические процессы повышают их доступность для растений, улучшают свойства и плодородие почв. Выращивание на втором этапе эксперимента смеси растений на чистой серой лесной почве и почвенных образцах с гранулятом, ранее инкубированных при культивировании растений или без них, показало, что в образцах с гранулятом продуктивность суммарной зеленой массы на 8–14% выше. Значения коэффициента микробного дыхания после эксперимента в почвенных образцах с гранулятом находились в диапазоне 0.11–0.12, что соответствует наиболее благоприятному и стабильному состоянию почвы, при этом в них сохранялась более высокая численность микроорганизмов. Полученный при термомеханической обработке осадков сточных вод гранулят может быть использован при проведении мероприятий по предотвращению деградации и восстановлению продуктивности нарушенных земель. Переработка осадка сточных вод в гранулят позволяет получить удобрение для сельского хозяйства и лесоводства, значительно сокращая площади необходимых для их хранения иловых площадок или даже исключая необходимость в них.

Ключевые слова: серая лесная почва; гранулят осадка сточных вод; дыхательная активность; микробный пул; плодородие; продуктивность растений.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.52.60>

Введение

Объемы образующихся осадков городских сточных вод ежегодно растут, что обостряет проблемы, связанные с экономически эффективной и экологически безопасной их утилизацией. Под депонирование осадков сточных вод (ОСВ) заняты значительные площади, а их экологически безопасная переработка и хранение требуют привлечения значительных материально-технических ресурсов. Все это заставляет искать новые пути безопасного применения и утилизации ОСВ.

Реутилизация органических отходов в сельском хозяйстве, лесоводстве и зеленом строительстве позволяет нивелировать нарушения в биологическом круговороте углерода, азота, фосфора и других биофильных элементов (Минеев и др., 2003; Плеханова, Бамбушева, 2009; Sepulvado et al., 2011).

Особую актуальность приобрели исследова-

ния, в которых проводится оценка эффективности применения ОСВ, их экологической безопасности, а также влияния на качество урожая. Комплексные агроэкологические исследования ОСВ и компостов на их основе, проведение модельных вегетационных и микрополевых опытов позволяют разрабатывать и дополнять теоретическую базу, необходимую для оптимизации применения данного вида нетрадиционных удобрений в агрикультуре и для решения проблем их экологически безопасной утилизации (Гунина, 2017).

При использовании необработанных ОСВ существует опасность загрязнения почв и грунтовых вод тяжелыми металлами, патогенной микрофлорой, яйцами гельминтов, дурно пахнущими веществами (Рязанов и др., 2020), что требует их предварительной обработки.

Технология обработки ОСВ, внедренная на МУП «Водоканал» г. Казани, предусматривает их

Таблица 1. Характеристики серой лесной почвы
Table 1. Characteristics of gray forest soil

Гумус, % Humus, %	$N_{вал}, %$ $N_{tot}, %$	$P_{общ}, %$ $P_{tot}, %$	$P_{подв.}, мг/кг$ $P_{мо.}, mg/kg$	$pH_{вод}$ pH_w
4.4	0.21	0.07	103	6.25

обезвоживание и сушку при температуре 105–110 °С до влажности 5–10%, что обеспечивает элиминацию условно-патогенной микрофлоры, повышает влагостойкость образующихся в процессе сушки гранул. Высушенный продукт – «гранулят» по своим характеристикам соответствует требованиям ГОСТ Р 17.4.3.07–2001, что позволяет использовать его в качестве удобрения.

Цель работы – изучить влияние гранулята ОСВ МУП «Водоканал» г. Казани на биохимическую активность, микробный пул и агрохимические характеристики серой лесной среднесуглинистой почвы, а также на продуктивность сельскохозяйственных растений.

Материалы и методы исследования

В эксперименте использовали серую лесную среднесуглинистую почву (табл. 1) и гранулят термомеханически обработанного осадка сточных вод МУП «Водоканал» г. Казани.

Гранулят ОСВ содержит необходимые для развития растений и почвенных микроорганизмов органические вещества и биогенные элементы (Исследование ..., 2022), что существенно повышает ценность получаемого продукта (табл. 2).

Хронические лабораторно-вегетационные эксперименты проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22030–2009. В качестве тест-объектов использовали рожь посевную (*Secale cereale L.*) и вику посевную (*Vicia sativa L.*), семена которых высевали в почву в соотношении 1:1. Выбор данных культур был обусловлен, в том числе, их устойчивостью к неблагоприятным факторам, способностью активировать почвенные процессы (Лапшин, 2016; Митрополова, 2020; Утомбаева и др., 2022).

В качестве вегетационных сосудов использовали пластиковые емкости диаметром 11 см и объемом 550 мл, содержащие 400 г почвы. Ин-

кубирование осуществляли при температуре 19–25 °С, влажности 20–25%, 16-часовом световом дне с интенсивностью освещения 4000 Лк. Количество повторностей в каждом варианте – 3.

В опытах с растениями в каждый сосуд высевали по 12 семян (6+6). Для выравнивания условий освещения местоположение вегетационных сосудов ежедневно меняли, варианты располагали рандомно. Через две недели после их прорастания часть растений срезали и оставляли по 6 растений в емкости (3+3). Еще через четыре недели (42 сутки) собирали остальные растения и определяли их наземную и подземную фитомассу.

В варианте Б после первого этапа эксперимента растения полностью удаляли из вегетационных сосудов; на втором этапе выполняли повторную высадку растений и определение фитомассы по аналогичной схеме.

После 1 и 2 этапов эксперимента в почвенных образцах определяли дыхательную активность и состав микробоценозов, содержание органического вещества, валовое содержание азота и фосфора, содержание подвижных форм фосфора.

Интенсивность почвенного дыхания устанавливали газохроматографическим методом (Вершинин и др., 2016). На основе измерений были определены параметры дыхательной активности: скорость базального дыхания ($V_{баз.}$), скорость субстрат-индуцированного дыхания ($V_{сид.}$), коэффициент микробного дыхания ($Q_r = V_{баз.}/V_{сид.}$). Концентрацию CO_2 в пробах определяли на газовом хроматографе «Хроматек Кристалл 5000.2».

Количественный и качественный состав микроорганизмов изучали методом посева почвенной суспензии на диагностические среды с использованием общепринятых методов (Егоров, 1995).

Результаты и их обсуждение

Режим термомеханической обработки ОСВ МУП «Водоканал» г. Казани обеспечивает получение гранулята, характеристики которого не ограничивают возможность его использования в качестве удобрения под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры, в промышленном цветоводстве, зеленом строитель-

Таблица 2. Характеристики гранулята ОСВ
Table 2. Characteristics of granulate sludges

Влажность, % Moisture, %	Орг. в-во, % Organic matter, %	Зольность, % Ash content, %	$N_{общ.}, %$ $N_{tot}, %$	$P_{общ.}, %$ $P_{tot}, %$	$P_{подв.}, мг/кг$ $P_{mob.}, mg/kg$	$pH_{сол}$ pH_{salt}	Класс опасности Hazard class
6.3	60.4	39.6	3.0	1.5	2000	6.2	IV

Таблица 3. Микробиологические характеристики гранулята ОСВ
Table 3. Microbiological characteristics of granulate sludges

Микроорганизмы Microorganisms	Количество, КОЕ/г абс. сухой массы Quantity, CFU/g abs. dry mass
Гетеротрофные / Heterotrophic	$1 \cdot 10^9$
Актиномицеты / Actinomycetes	$4.9 \cdot 10^7$
Микромицеты / Micromycetes	≤ 100
Бактерии, утилизирующие минеральный азот / Bacteria recycling mineral nitrogen	$1.0 \cdot 10^8$
Целлюлозоразрушающие / Pulp destructing	$0.5 \cdot 10^4$
Нитрификаторы / Nitrifiers	1

стве, лесных и декоративных питомниках, для биологической рекультивации нарушенных земель и полигонов ТБО (ГОСТ Р 17.4.3.07–2001).

Микробиологический анализ гранулята показал, что даже после термической обработки он содержит достаточно широкий перечень микроорганизмов, способных обогатить почвенные микробиоценозы нарушенных земель (табл. 3).

С целью изучения возможности использования гранулята ОСВ в качестве удобрения был проведен двухэтапный эксперимент, который состоял из трех параллельных опытов (табл. 4).

Сопоставление параметров дыхательной активности показало, что инкубация образцов серой лесной почвы (вариант 1К) в условиях рыхления и увлажнения привела к 1.5-кратному увеличению скорости базального дыхания (рис. 1). При этом интенсивность почвенного дыхания в присутствии гранулята (варианты 1А и 1Б) была в 2.3 раза выше, чем в исходной почве до ее инкубации (вариант К) и в 1.6 раза выше, чем в контрольных почвенных образцах после первого этапа эксперимента (вариант 1К). Культивирование растений на почве с гранулятом (вариант 1Б) никак не отра-

жалось на величине $V_{\text{базал}}$.

Выращивание растений на втором этапе эксперимента привело к существенному уменьшению $V_{\text{базал}}$ и нивелированию различий между вариантами, что указывает на снижение влияния гранулята на эмиссию углекислого газа в атмосферу.

Периодическое рыхление и увлажнение почвенных образцов без гранулята (1К) в ходе полуторамесячной инкубации привело к 1.6-кратному увеличению $V_{\text{сид}}$, что указывает на повышение активности резидентной микрофлоры (рис. 2). В вариантах с гранулятом величина субстрат-индуцированного дыхания превосходила данный параметр контрольных образцов (1К), что связано как с появлением дополнительных питательных веществ, так и с внесением аллохтонной микрофлоры, способствующей росту дыхательной активности.

Гранулят в условиях рыхления (вариант 1А) в 2.2 раза увеличивал интенсивность $V_{\text{сид}}$, означая возрастание активности микробного сообщества. Тот же эффект, но в меньшей степени обнаружен и на 2 этапе эксперимента (вариант 2А).

На первом этапе при выращивании растений

Таблица 4. Варианты опытов на последовательных этапах эксперимента
Table 4. Variants of experiments at successive stages of the experiment

Исходные образцы (варианты)		
К (контроль)	А	Б
Чистая почва	Почва, содержащая гранулят из расчета 10 т/га	
1 этап (варианты)		
1К	1А	1Б
Проба К 42-суточная инкубация (перемешивание, увлажнение)	Проба А 42-суточная инкубация (перемешивание, увлажнение)	Проба Б 42-суточное культивирование растений (увлажнение)
2 этап (варианты)		
2К	2А	2Б
Проба 1К 42-суточное культивирование растений (увлажнение)	Проба 1А 42-суточное культивирование растений (увлажнение)	Проба 1Б 42-суточное культивирование растений (увлажнение)

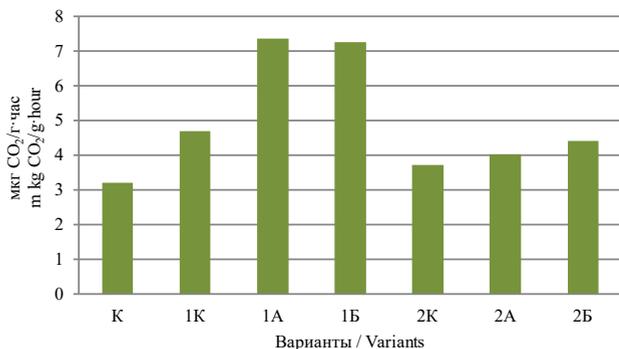


Рис. 1. Интенсивность базального дыхания
Fig. 1. Basal respiration rates

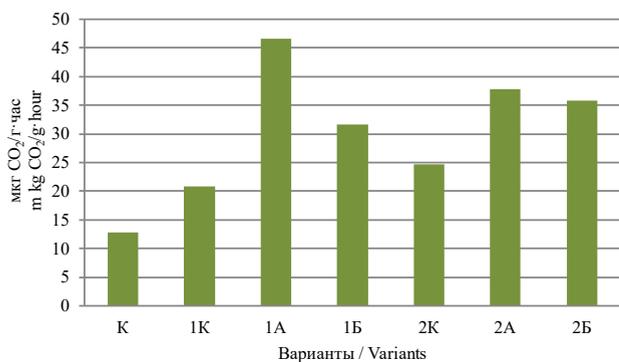


Рис. 2. Интенсивность субстрат-индуцированного дыхания
Fig. 2. Substrate induced respiration rate

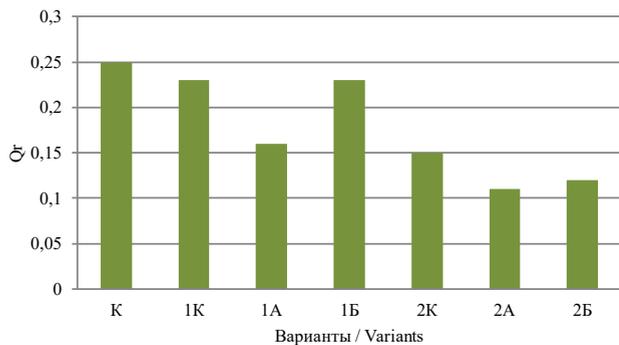


Рис. 3. Коэффициент микробного дыхания
Fig. 3. Microbial respiration coefficient

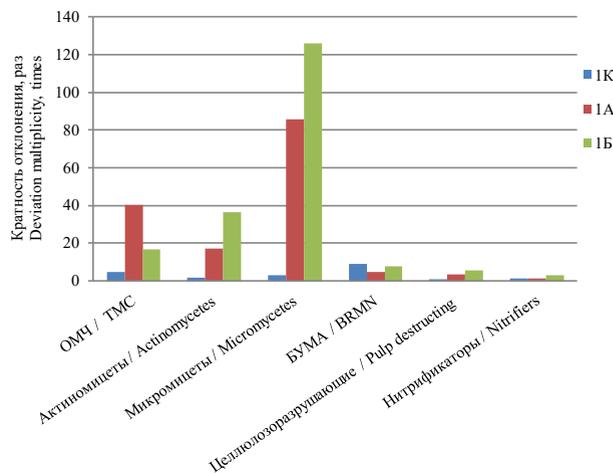


Рис. 4. Изменение численности микроорганизмов после первого этапа эксперимента (исходное количество (K = 1.0))
Fig. 4. Changes in the number of microorganisms after the first stage of the experiment (initial number (K = 1.0))

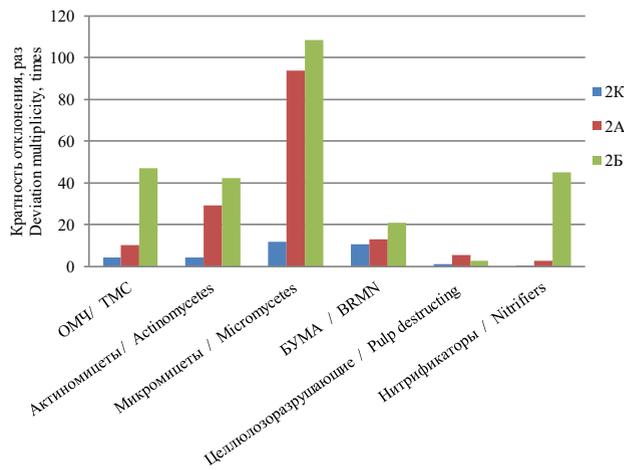


Рис. 5. Изменение численности микроорганизмов после второго этапа эксперимента (начальное количество (K = 1.0))
Fig. 5. Changes in the number of microorganisms after the second stage of the experiment (initial number (K = 1.0))

Таблица 5. Относительное содержание подвижных форм фосфора в почвах
Table 5. Relative content of mobile forms of phosphorus in soils

	Варианты / Variants					
	1K	1A	1B	2K	2A	2B
P _{подв.} , % / P _{mob.} , %	6.7	11.1	9.6	8.6	14.1	19.9

на почве с гранулятом (вариант 1Б) уровень субстрат-индуцированного дыхания был в 1.4 раза выше, чем в контроле (1К), но в 1.5 раза ниже, чем в опыте без растений (вариант 1А), что вероятно, определяется конкуренцией растений и микроорганизмов за питательные субстраты, менее интенсивными массообменными процессами при инкубации без перемешивания.

Посев растений в почву на 2 этапе эксперимента нивелировал различия $V_{\text{сид}}$ в вариантах 2А и 2Б, она была на одном уровне.

Коэффициент микробного дыхания (Q_r) является важным эколого-физиологическим показателем, позволяющим судить о состоянии микробного сообщества, о наличии или отсутствии действия неблагоприятных климатических или антропогенных воздействий на почву. Анализ значений Q_r показывает, что внесение гранулята не приводило к разбалансированности почвенных процессов и к нарушению устойчивости микробного пула почв (рис. 3). Во всех случаях стабильность почвенных микробоценозов с гранулятом существенно не отличалась от варианта без гранулята. Необходимо отметить, что на втором этапе опыта значения Q_r располагались в диапазоне 0.11–0.15, что, по мнению ряда исследователей, соответствует наиболее благоприятному состоянию почвы (Anderson, Domsch, 1993; Hund, Schenk, 1994; Благодатская, 1996; Ананьева, 1993).

Инкубация исходного образца почвы в заданных условиях (вариант 1К) привела к увеличению численности гетеротрофных микроорганизмов (ОМЧ) в 4.7 раза, актиномицетов – в 1.6 раза, микромицетов – 3.1 раза, бактерий, утилизирующих минеральный азот (БУМА), – в 9.1 раза (рис. 4). После первого этапа эксперимента в опытных вариантах количество микроорганизмов было значительно выше, чем в контроле. Выращивание растений в почве с гранулятом (вариант 1Б) привело к 2.9-кратному увеличению количества нитрификаторов.

Возрастание количества микромицетов на органоминеральном фоне можно рассматривать как положительный тренд, так как они являются активными трансформаторами органического материала на последних стадиях его разложения. Однако после первого этапа эксперимента в отличие от контроля, характеризующегося видовым разнообразием микромицетного комплекса, в варианте 1А они были представлены одним доминирующим видом. В варианте 1Б доминирование данного штамма наблюдалось, однако в этом случае пул включал и другие виды микромицетов.

После второго этапа эксперимента числен-

ность всех групп микроорганизмов в опытных образцах была выше, чем в контрольной почве (рис. 5). В последней (2К) наблюдалось снижение численности нитрифицирующих микроорганизмов. В вариантах с гранулятом микробный пул содержал несколько видов микромицетов при менее выраженном количественном преобладании доминировавшего на первом этапе штамма. Внесение гранулята ОСВ в исходную почву (вариант К) из расчета 10 т/га привело к увеличению содержания органического вещества в вариантах А и Б на 1.5%. Однако, проведенный после первого этапа эксперимента анализ показал, что в вариантах 1А и 1Б его содержание было на 11.7% выше, чем в образцах исходных образцах с гранулятом (А и Б) и на 13.8% выше, чем в варианте 1К, что, вероятно, определяется высокой биохимической активностью формирующегося в присутствии ОСВ почвенного микробоценоза. При выращивании растений на втором этапе эксперимента в контрольных и опытных почвенных образцах наблюдалось снижение содержания органического вещества, однако в образцах с гранулятом оно было несколько выше, чем в контрольном (2К) и исходной почве с гранулятом (рис. 6.)

Внесение гранулята в исходную почву увеличило валовое содержание азота и фосфора в опытных почвенных образцах на 25 и 40%, соответственно. После первого этапа эксперимента в вариантах почв с гранулятом валовое содержание азота было на 21% (вариант 1А) и на 42% (вариант 1Б) выше, чем в варианте 1К (рис. 7). Если в варианте 1А уровень азота согласуется с внесенным с гранулятом количеством, то в 1Б он был в 1.7 раза выше. Увеличение содержания азота в варианте 1Б вероятно связано с симбиотическим действием бобового растения (*Vicia sativa L.*) и клубеньковых бактерий, приводящим к накоплению азота в почве.

После второго этапа эксперимента содержание $N_{\text{вал}}$ в контрольном варианте (2К) не изменилось, а в опытных оно снизилось, но было на 5% (2А) и на 21% (2Б) выше, чем в варианте без гранулята (2К).

Содержание фосфора в вариантах 1А и 1Б после первого этапа эксперимента было на 32% и 58% выше, чем в варианте 1К (рис. 8). На втором этапе после выращивания растений в варианте 2К общее содержание фосфора не изменилось, а в варианте 2А незначительно увеличилось (рис. 8). В варианте 2Б после повторного выращивания растений содержание фосфора снизилось до значений близких, к контрольному варианту (2К).

После первого этапа эксперимента содержание подвижных форм фосфора в вариантах с гра-

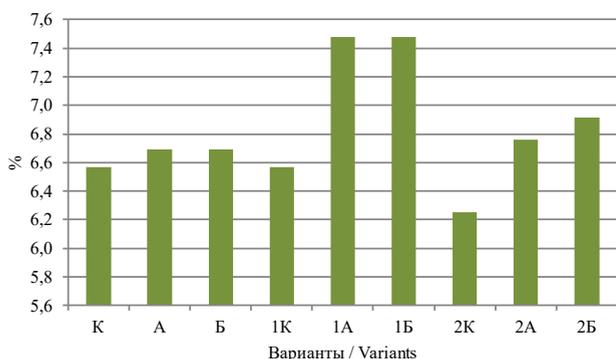


Рис. 6. Содержание органического вещества в почвах

Fig. 6. The organic matter content in soils

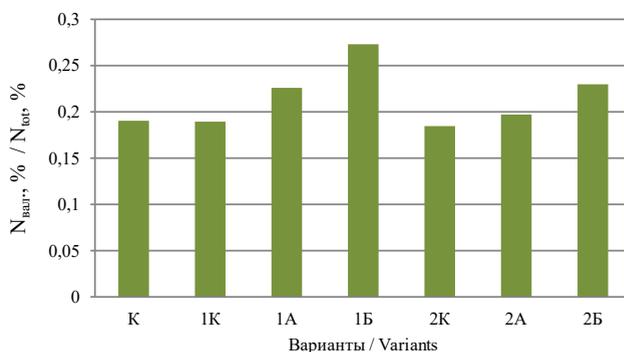


Рис. 7. Содержание валового азота в почвах

Fig. 7. Total nitrogen content in soils

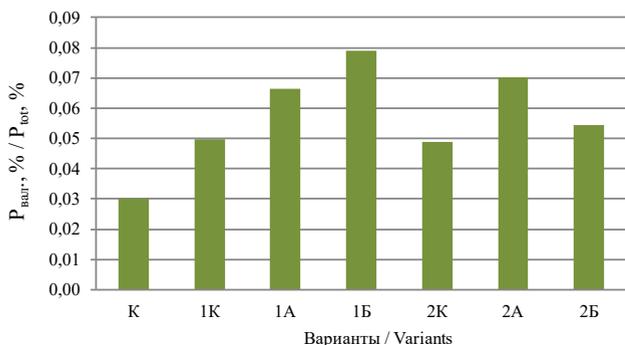


Рис. 8. Содержание валового фосфора в почвах

Fig. 8. Total phosphorus content in soils

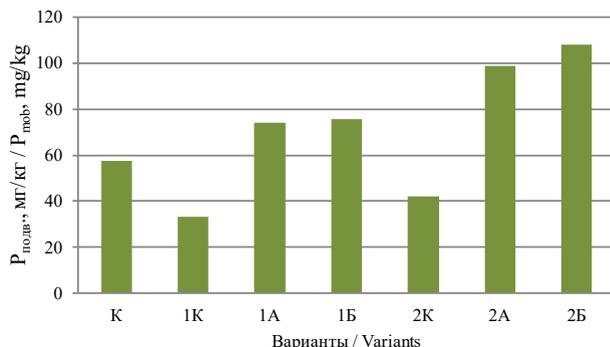


Рис. 9. Содержание подвижных форм фосфора в почвах

Fig. 9. Content of mobile forms of phosphorus in soils

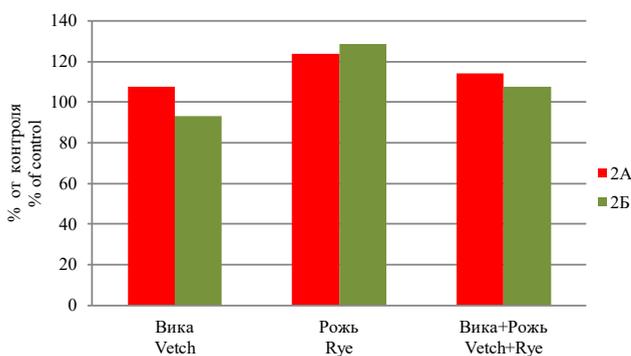


Рис. 10. Влияние гранулята на прирост надземной фитомассы растений на втором этапе эксперимента

Fig. 10. Effect of granulate on green mass gain in the second stage of the experiment

нулятом было на 29–32% выше, а в контрольной (1К) – на 48% ниже, чем в исходной почве (рис. 9).

На втором этапе эксперимента проходящие в почве микробиологические процессы, корневые выделения растений трансформировали внесенные с гранулятом питательные вещества, что привело к увеличению доли подвижных форм фосфора в контрольном и опытных вариантах (табл. 5) увеличению содержания $P_{\text{подв}}$ в образцах 2А и 2Б

на 33% и 43%, соответственно, от их концентрации в почвенных образцах после первого этапа эксперимента.

На втором этапе эксперимента при выращивании растений в присутствии гранулята наблюдался 8–14% прирост суммарной надземной фитомассы (рис. 10), а также увеличение массы корней на 6–9%. При этом продуктивность ржи в образцах с гранулятом была на 24–29% выше, а вики незначительно отличалась от контроля (2К).

Следует отметить, что в варианте Б суммарная биомасса растений за два этапа эксперимента относительно фитомассы, выросшей на почвенных образцах без гранулята (2К), составила 166%, 197% и 178% у вики, ржи и смеси растений, соответственно, а относительно варианта А она составила 154%, 159 и 156%, соответственно.

Закключение

Проведенные исследования показали, что внесение гранулята ОСВ МУП «Водоканал» в серую лесную среднесуглинистую почву из расчета 10 т/га увеличивает численность и разнообразие микробного пула, способствует активизации почвенных процессов при сохранении стабильности микробного сообщества. Присутствующие в гра-

нуляте органические и минеральные компоненты обогащают почву, а проходящие биохимические процессы повышают их доступность для растений, улучшают свойства почв и повышают их плодородие.

Через 3 месяца после внесения гранулята различия в уровнях эмиссии CO₂ в вариантах с гранулятом ОСВ и без него нивелируются.

Сидеральный посев растений сразу после внесения гранулята или выдержка почвы с гранулятом без растений в целом дают близкий эффект, положительно влияют на свойства и продуктивность почвы. И в том, и другом случаях в почвах отмечается синтез органического вещества и увеличение содержания подвижных форм фосфора. При выращивании смеси злаковых и бобовых растений на первом этапе эксперимента в почвах с гранулятом отмечено увеличение содержания общего азота.

На втором этапе эксперимента при посеве смеси растений присутствие гранулята в почве привело к увеличению подземной и надземной фитомассы.

Результаты исследований показывают, что полученный при термомеханической обработке осадков сточных вод МУП «Водоканал» гранулят может быть использован при проведении различных мероприятий, направленных на восстановление продуктивности земель. Переработка ОСВ в гранулят позволяет получить эффективное удобрение для сельского хозяйства и лесоводства, уменьшая (или исключая) значительные площади иловых площадок для их хранения.

Список литературы

1. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякшина Т.Н. Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // Почвоведение. 1993. №11. С. 72–77.
2. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. №11. С. 1341–1346.
3. Вершинин А.А., Петров А.М., Каримуллин Л.К., Шурмина Н.В. Культивирование высших растений и дыхательная активность нефтезагрязненных почв // Российский журнал прикладной экологии. 2016. №3. С. 46–51.
4. ГОСТ Р ИСО 22033–2009. Качество почвы. Биологические методы. Хроническая токсичность в отношении высших растений.
5. ГОСТ Р 17.4.3.07–2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений.
6. ГОСТ Р 52838–2007. Корма. Методы определения содержания сухого вещества.
7. Гунина Е.А. Агроэкологическая оценка осадков сточных вод очистных сооружений Южное Бутово г. Москвы для применения в агрикультуре: Дисс. ... канд. биол. наук. М., 2017. 142 с.

8. Егоров Н.С. Руководство к практическим занятиям по микробиологии. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.

9. Исследование и оценка физико-химических, токсикологических и микробиологических характеристик гранулята – термически обработанного илового осадка биологических очистных сооружений канализации и научное обоснование направлений его утилизации. Отчет о НИР. Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан. Казань, 2022. 23 с.

10. Лапшин Ю.А. Смешанные озимые агрофитоценозы как способ производства высококачественного зеленого корма и фуражного зерна // Вестник Марийского государственного университета. Сер. Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. 2016. №1. С. 3034.

11. Минеев В.Г., Анциферова Е.Ю., Большева Т.Н., Касатиков В.А. Распределение кадмия и свинца в профиле дерново-подзолистой почвы при длительном удобрении ее осадками сточных вод // Агрехимия. 2003. №1. С. 45–49.

12. Митрополова Л.В., Коротких Э.В., Павлова О.В., Ивлева О.Е., Дуденко Г.А. Роль сидератов в улучшении агрофизических показателей буроземно-луговой почвы в условиях Приморского края // Кронос. 2020. №7. С. 52–56.

13. Плеханова И.О., Бамбушева В.А. Мониторинг содержания тяжелых металлов в агродерново-подзолистых супесчаных почвах Восточного Подмосквья, загрязненных в результате применения осадков сточных вод // Экологические проблемы агрохимии. 2009. №3. С. 27–34.

14. Рязанов С. С., Кулагина В. И., Грачев А. Н., Сунгатуллина Л. М., Забелкин С. А., Шагидуллин Р. Р. Влияние биоуглей из илов сточных вод на рост растений, почвенные микроорганизмы и содержание азота в серых лесных почвах // Принципы экологии. 2020. №4. С. 54–70. doi: 10.15393/j1.art.2020.10282

15. Утомбаева А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В., Петров А.М. Скрининг растений для фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 1. С. 68–75. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.68.75>.

16. Anderson T.-H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils // Soil biology & biochemistry. 1993. Vol. 25, № 3. P. 393–395.

17. Hund K, Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes // Chemosphere. 1994. Vol. 28, №3. P. 477–490.

18. Sepulvado J.G., Blaine A.C., Hundal L.S., Higgins C.P. Occurance and Fate of Perfluorochemicals in Soil Following the land application of municipal biosolids // Environmental science & technology. 2011. №45. P. 8106–8112.

References

1. Anan`eva N.D., Blagodatskaya E.V., Orlinkij D.V., Myakshima T.N. Metodicheskie aspekti opredeleniya skorosti substrat-inducirovannogo dyhaniya pochvennyh mikroorganizmov [Methodological aspects of determining the rate of substrate-induced respiration of soil microorganisms] // Pochvovedenie [Soil science]. 1993. No 11. P. 72–77.
2. Blagodatskaya E.V., Anan`eva N.D. Ocenka ustojchivosti mikrobyh soobshchestv v processe razlozheniya pollutantov v pochve [Evaluation of the resistance of microbial communities in the process of decomposition of pollutants in soil] // Pochvovedenie [Soil science]. 1996. No 11. P. 1341–1346.
3. Vershinin A.A., Petrov A.M., Karimullin L.K., Shurmina N.V. Kul'tivirovanie vysshih rastenij i dyhatel'naya aktivnost' neftezagryaznennyh pochv [Cultivation of higher plants and

- respiratory activity of oily soils] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2016. No 3. P. 46–51.
4. GOST R ISO 22033–2009. Kachestvo pochvy. Biologicheskie metody. Hronicheskaya toksichnost' v otnoshenii vysshih rastenij [Soil quality. Biological methods. Chronic toxicity to higher plants].
5. GOST R 17.4.3.07–2001. Ohrana prirody. Pochvy. Trebovaniya k svoystvam osadkov stochnyh vod pri ispol'zovanii ih v kachestve udobrenij [Conservation. Soils. Requirements for the properties of wastewater sludge when used as fertilizer].
6. GOST R 52838–2007. Korma. Metody opredeleniya soderzhaniya suhogo veshchestva [Feed. Dry matter determination methods.].
7. Gunina E.A. Agroekologicheskaya ocenka osadkov stochnyh vod ochestnyh sooruzhenij YUzhnoe Butovo g. Moskvy dlya primeneniya v agrikul'ture [Agroecological assessment of wastewater sludge at the South Butovo treatment facilities in Moscow for use in agriculture]: DSc (Cand. of biol.) thesis. Moscow, 2017. 142 p.
8. Egorov N.S. Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po mikrobiologii [Microbiology practice guide]. Moscow, 1995. 224 p.
9. Issledovanie i ocenka fiziko-himicheskikh, toksikologicheskikh i mikrobiologicheskikh harakteristik granulyata – termicheski obrabotannogo ilovogo osadka biologicheskikh ochestnyh sooruzhenij kanalizacii i nauchnoe obosnovanie napravlenij ego utilizacii [Study and assessment of physical, chemical, toxicological and microbiological characteristics of granulate - thermally treated sludge of biological sewage treatment facilities and scientific justification of its disposal directions] Institut problem ekologii i nedropol'zovaniya Akademii nauk Respubliki Tatarstan. Kazan, 2022. 23 p.
10. Lapshin Yu.A. Smeshannye ozimye agrofитоcенозы как способ производства высококачественного зеленого корма и фуражного зерна [Mixed winter agrophytocenoses as a way to produce high-quality green feed and forage grains] // Vestnik Marijskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. «Sel'skooz'yajstvennyye nauki. Ekonomicheskie nauki» [Proceedings of Mari State University. Ser. Rural and economic sciences. Economic sciences]. 2016. No 1. P. 30–34.
11. Mineev V.G., Anciferova E.Yu., Boly'sheva T.N., Kasatkov V.A. Raspreделение кадмия и свинца в профиле дерново-подзолистой почвы при длител'ном удобренii ee осадками сточных вод [Distribution of cadmium and lead in the profile of soddy-podzolic soil during long-term fertilization with sewage sludge] // Agrokhimiya [Agrochemistry]. 2003. No 1. P. 45–49.
12. Mitropolova L.V., Korotkih E.V., Pavlova O.V., Ievleva O.E., Dudenko G.A. Rol' sideratov v uluchshenii agrofizicheskikh pokazatelej burozemno-lugovoj pochvy v usloviyah Primorskogo kraja [Role of siderates in improving agrophysical parameters of brown-meadow soil in Primorsky kraj] // Chronos. 2020. No 7. P. 52–56.
13. Plexanova I.O., Bambusheva V.A. Monitoring soderzhaniya tyazhelyx metallov v agrodernovo-podzolistyx supeschanyx pochvax Vostochnogo Podmoskov'ya, zagryaznennyx v rezul'tate primeneniya osadkov stochnyx vod [Monitoring of heavy metals content in agro-podzolic sandy loamy soils of the Eastern Moscow region, contaminated as a result of the use of sewage sludge] // E'kologicheskie problemy' agrokhimii [Environmental problems of agrochemistry]. 2009. No 3. P. 27–34.
14. Ryazanov S.S., Kulagina V.I., Grachev A.N., Sungatullina L.M., Zabelkin S.A., Shagidullin R.R. Vliyanie biougle iz ilov stochnyh vod na rost rastenij, pochvennyye mikroorganizmy i soderzhanie azota v seryh lesnyh pochvax [Effect of wastewater silt bio-coal on plant growth, soil microorganisms, and nitrogen content in gray forest soils] // Principy ekologii [Principles of ecology]. 2020. No 4. P. 54–70. doi: 10.15393/j1.art.2020.10282.
15. Utombaeva A.A., Zainulgabidinov E'R., Kuznecova T.V., Petrov A.M. Skringing rastenij dlya fitoremediacii neftezagryaznennyx pochv [Screening of plants for phytoremediation of oil-contaminated soils] // Rossijskij zhurnal prikladnoj e'kologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2022. No 1. P. 68–75. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.68.75>.
16. Anderson T.-H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils // Soil biology & biochemistry. 1993. Vol. 25, No 3. P. 393–395.
17. Hund K., Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes // Chemosphere. 1994. Vol. 28, No 3. P. 477–490.
18. Sepulvado J.G., Blaine A.C., Hundal L. S., Higgins C.P. Occurance and Fate of Perfluorochemicals in Soil Following the land application of municipal biosolids // Enviromental science & technology. 2011. No 45. P. 8106–8112.

Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zainulgabidinov E.R., Kuznetsova T.V., Vershinin A.A., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. **Effect of sewage sludge granulate on gray forest soil characteristics and plant productivity.**

The two-stage complex experiment studied the impact of the introduction of thermomechanically treated granulated sewage sludge of the Vodokanal Municipal Unitary Enterprise in Kazan on the characteristics of gray forest medium-carbonaceous soil and the productivity of the mixture of mono- and dicotyledonous plants grown on it (sown rye and sown vetch). It has been shown that in the first 6 weeks of incubation of soil samples, the introduction of granulate at the rate of 10 t/ha during maintenance without plants and during cultivation of plants leads to an increase in the respiratory activity of the soil, contributes to an increase in its microbiological diversity, while maintaining its stability. The sediment granulate enriches the soil with organic and mineral components, and the ongoing biochemical processes increase their availability to plants, improve soil properties and fertility. Growing at the second stage of the experiment a mixture of plants on pure gray forest soil and soil samples with granulate, previously incubated in cultivated plants or without them, showed that the samples with granulate productivity of total green mass by 8–14% higher. The values of the microbial respiration coefficient after the experiment in soil samples with granulate were in the range of 0.11–0.12, which, according to a number of researchers, corresponds to the most favorable and stable soil condition, while a higher number of microorganisms remained in them.

The granulate obtained during thermomechanical treatment of wastewater sludge of the Vodokanal Municipal Unitary Enterprise can be used to prevent and reduce degradation, protection and restoration of land productivity. Processing sewage sludge into granulate allows us to obtain fertilizer for agriculture and forestry, significantly reducing the area of silt sludge sites necessary for their storage or even eliminating the need for them.

Keywords: gray forest soil; granulate of sewage sludge; respiratory activity; microbial pool; fertility; plant productivity.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 31.08.2022

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 14.09.2022

Принята к публикации / Accepted for publication: 10.10.2022

Информация об авторах

Утомбаева Алина Александровна, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: semionova.alin@yandex.ru.

Петров Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: zpam2@rambler.ru.

Зайнулгабидинов Эрик Ренатович, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: comp05@mail.ru.

Кузнецова Татьяна Васильевна, научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, Россия, 420087, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: kuznetsovatyana@mail.ru.

Вершинин Анатолий Андреевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: A-vershinin@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Шагидуллин Рифгат Роальдович, доктор химических наук, директор, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: Shagidullin_@mail.ru.

Information about the authors

Alina A. Utombaeva, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: semionova.alin@yandex.ru.

Andrey M. Petrov, Ph.D. in Biology, Head of the Laboratory, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: zpam2@rambler.ru.

Erik R. Zainulgabidinov, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: comp05@mail.ru.

Tatyana V. Kuznetsova, Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: kuznetsovatyana@mail.ru.

Anatoly A. Vershinin, Ph.D. in Biology, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: A-vershinin@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, Ph.D. in Biology, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: water-rf@mail.ru.

Rifgat R. Shagidullin, D.Sci. in Chemistry, Director of the Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Dauruskaya st., Kazan, 420087, Russia, E-mail: Shagidullin_@mail.ru.

