

Подходы к испытанию удобрений контролируемого действия

© 2022. Е. В. Товстик¹, к. б. н., доцент, с. н. с.,
 С. Г. Скугорева², к. б. н., н. с., Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
 Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Вятский государственный университет,
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
 Российской академии наук,
 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
 e-mail: tovstik2006@inbox.ru

Отчуждение элементов питания из почвы является одной из наиболее актуальных проблем растениеводства. Она приводит к дефициту элементов питания в растениях, а также к увеличению себестоимости продукции. Причиной обеднения почв может быть не только вынос питательных веществ с урожаем, но и вымывание их из почвы с атмосферными осадками и поливными водами. Восполнить дефицит элементов питания в почве возможно посредством внесения удобрений контролируемого действия (УКД). По сравнению с традиционными удобрениями, они содержат элементы питания в форме, которая позволяет отсрочить их высвобождение или удлинить срок их доступности для растений в почве. Следует отметить, что применению любых удобрений, в том числе УКД предшествуют предварительные испытания. При этом единых стандартов лабораторных испытаний УКД в настоящее время не разработано. Сложность заключается ещё и в том, что часто отсутствует корреляция между данными, полученными в результате лабораторных исследований, и фактической скоростью высвобождения питательных веществ в полевых условиях. В работе предпринята попытка оценить профиль высвобождения элементов питания из УКД и вымывание элементов питания из почвы, для чего использованы две модельные системы: стационарная с дистиллированной водой и система периодического выщелачивания элементов питания из почвенной среды. В качестве критериев оценки использовали значения удельной электропроводности и концентрации неорганических ионов в растворе. Профиль вымывания из почвы исследуемых катионов при внесении УКД имел вид: $K^+ > Mg^{2+} > NH_4^+$; анионов – $NO_3^- > SO_4^{2-} > PO_4^{3-}$. По результатам лабораторного эксперимента профиль вымывания катионов из почвы несколько отличался от профиля высвобождения из УКД в воде, что может быть связано с микробиологическими процессами в почве. За 113 суток эксперимента с дистиллированной водой, в которую было помещено УКД, доля высвободившихся ионов составила (в % от внесённого с удобрением): $PO_4^{3-} - 92,5$; $NO_3^- - 50,6$; $NH_4^+ - 48,8$; $K^+ - 41,8$; $SO_4^{2-} - 39,9$; $Mg^{2+} - 13,5$. За период наблюдений доля вымытых элементов питания в пересчёте на соответствующие ионы из удобрения в почве с учётом естественного выщелачивания составила (в % от внесённого с удобрением): $SO_4^{2-} - 5,5$; $NO_3^- - 4,7$; $Mg^{2+} - 3,5$; $PO_4^{3-} - 1,2$; $NH_4^+ - 1,2$; $K^+ - 0,97$. Способы и критерии оценки профиля высвобождения элементов питания из УКД и вымывания элементов питания из почвы, обсуждаемые в статье, могут быть использованы для испытания новых линеек удобрений в лабораторных условиях.

Ключевые слова: удобрения контролируемого действия, элементы питания, профиль высвобождения ионов, вымывание, накопительные кривые, удельная электропроводность.

Approaches to testing controlled fertilizers

© 2022. E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076, S. G. Skugoreva² ORCID: 0000-0002-5902-5187,
 T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X, T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047,
¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, ,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: tovstik2006@inbox.ru

The alienation of nutrients from the soil is one of the most urgent problems of crop production. It leads to a deficiency of nutrients in plants, as well as to an increase in the cost of production. The reason for soil depletion can be not only the removal of nutrients with the harvest, but also their leaching from the soil with atmospheric precipitation and irrigation water. It is possible to fill the deficiency of nutrients in the soil through the application of controlled release fertilizers

(CRF). Compared to conventional fertilizers, they contain the nutrients in a form that allows them to be released later or to extend their availability to plants in the soil. It should be noted that the use of any fertilizers, including CRF, is preceded by preliminary tests. At the same time, there are no unified standards for laboratory tests of CRF at present. Another difficulty is that there is often no correlation between data obtained from laboratory studies and the actual rate of release of nutrients in the field. In this work, an attempt was made to evaluate the profile of the release of nutrients from the CRF and the leaching of nutrients from the soil, for which two model systems were used: a stationary one with distilled water and a system of periodic leaching of nutrients from the soil environment. The specific electrical conductivity and concentration of inorganic ions in the solution were used as evaluation criteria. The profile of the leaching of the studied cations from the soil upon the introduction of the CRF had the form: $K^+ > Mg^{2+} > NH_4^+$; anions – $NO_3^- > SO_4^{2-} > PO_4^{3-}$. According to the results of a laboratory experiment, the profile of cation leaching from the soil differed somewhat from the release profile from the CRF in water, which may be associated with microbiological processes in the soil. For 113 days of the experiment with distilled water, in which the CRF was placed, the proportion of released ions was (in % of the amount applied with fertilizer): $PO_4^{3-} - 92.5$; $NO_3^- - 50.6$; $NH_4^+ - 48.8$; $K^+ - 41.8$; $SO_4^{2-} - 39.9$; $Mg^{2+} - 13.5$. During the observation period, the proportion of washed out nutrients in terms of the corresponding ions from the fertilizer in the soil, taking into account natural leaching, was (in % of the amount applied with fertilizer): $SO_4^{2-} - 5.5$; $NO_3^- - 4.7$; $Mg^{2+} - 3.5$; $PO_4^{3-} - 1.2$; $NH_4^+ - 1.2$; $K^+ - 0.97$. Methods and criteria for evaluating the profile of the release of nutrients from the CRF and the leaching of nutrients from the soil, discussed in the article, can be used to test new lines of fertilizers in the laboratory.

Keywords: controlled fertilizers, ion release profile, washout, accumulation curves, electrical conductivity.

Проблема обеднения почв не теряет своей актуальности, несмотря на давно известные механизмы компенсации отчуждения элементов питания с урожаем [1–5]. В настоящее время частичным решением данного вопроса является использование удобрений контролируемого действия (УКД). С каждым годом интерес к этому виду агрохимикатов возрастает, о чём свидетельствует увеличение в российской (РИНЦ) и международных базах данных Scopus (рис. 1) и Web of Science количества научных публикаций, к примеру, демонстрирующих их успешное применение в растениеводческой практике.

Особое внимание к УКД обусловлено их перспективностью [6–8]. По сравнению с тради-

ционными удобрениями, они позволяют значительно снизить потерю элементов питания в почве [9, 10]. Однако применение данных агрохимикатов всё ещё остаётся ограниченным ввиду относительной дороговизны и частичной нерешённости проблемы биоразложения их синтетических оболочек [11–13].

С точки зрения эффективности УКД ключевым вопросом является скорость высвобождения питательных веществ из их гранул, которая может зависеть от разных факторов (относительная масса оболочки, её состав, толщина и пр.) [14]. Следует отметить, что в настоящее время спектр стандартизированных методов оценки и регламент процедуры тестирования УКД ограничен. Зачастую эф-

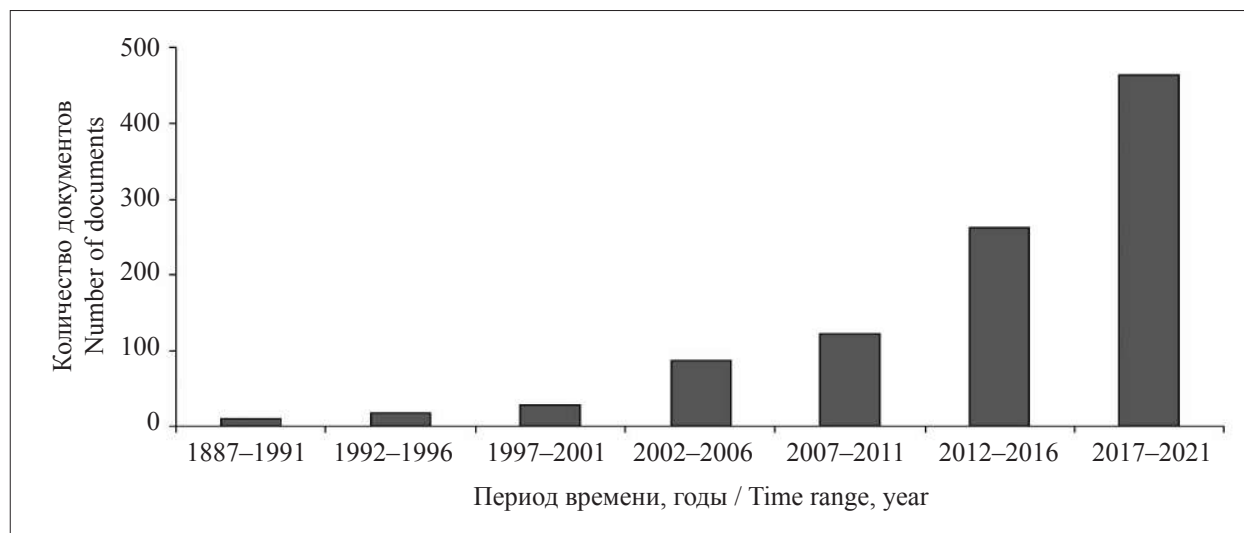


Рис. 1. Тенденции роста числа научных работ в базе данных Scopus за период с 1987 по 2021 гг. по тематическому запросу «удобрения с контролируемым высвобождением»

Fig. 1. Growth trends of scientific works in the Scopus database for the period from 1987 to 2021 by for the thematic query “controlled release fertilizers”

эффективность УЖД прогнозируют с помощью математических моделей [15–20]. Методики лабораторного тестирования чаще всего опираются на испытания УЖД в двух средах: деминерализованной воде и почве. В качестве критериев оценки в случае воды используют тест на растворение, твёрдость гранул, pH, скорость поглощения влаги. Испытание УЖД в почве включает оценку содержания доступных форм питательных элементов в почве, pH и электропроводность водной вытяжки из почв [2].

Цель работы: оценить профиль высвобождения элементов питания из УЖД (в опыте с дистиллированной водой) и охарактеризовать процесс вымывания элементов питания в условиях применения УЖД (в опыте с почвой).

Объекты и методы исследования

В лабораторном эксперименте проводили испытания УЖД Osmocote Exact Standard [21], предназначенного для внесения в почву. Перед закладкой опытов анализировали химический состав УЖД методом ионной хроматографии. Для этого гранулы удобрений предварительно измельчали в лабораторной мельнице, а затем растворяли в деионизованной воде. По результатам анализа содержание неорганических ионов в УЖД составило (в г/кг удобрения): NO_3^- – 285,6; NH_4^+ – 75,9; PO_4^{3-} – 87,4; K^+ – 97,8; Mg^{2+} – 25,9; SO_4^{2-} – 184,0. Гранулы УЖД покрыты органической полупроницаемой оболочкой из биоразлагаемой смолы на основе растительных масел. Масса навески удобрения, используемая в опытах, составляла 3,00 г (количество гранул 100–110 шт.).

Испытания проводили при комнатной температуре (20 ± 2 °C) в двух средах: дистиллированной воде и дерново-подзолистой почве (табл. 1).

О высвобождении элементов питания из УЖД судили по диффузии его растворимых компонентов в дистиллированную воду в стационарных условиях. Навески удобрения помещали в контейнеры объёмом 250 см³ (площадь дна контейнера 53 см²), приливали 200 см³ дистиллированной воды и герметично закрывали крышками для предотвращения испарения воды и поглощения газов из воздуха. Контролем служила дистиллированная вода без удобрения. Повторность опыта трёхкратная. Общее число контейнеров – 54. Длительность эксперимента составила 113 сут. Диффузию растворимых компонентов удобрения в дистиллированную воду проверяли с интервалом в две недели. Контейнеры, из которых были взяты пробы на анализ, обратно в опыт не возвращали. Подготовка проб для анализа заключалась в извлечении гранул удобрений из контейнеров, перемешивании растворов и фильтровании их через бумажный фильтр «синяя лента».

Исследование вымывания элементов питания из почвы при использовании УЖД проводили в дренажных колонках путём выщелачивания проточной дистиллированной водой по методике, изложенной в работе [22]. Колонки для опыта конструировали самостоятельно из бутылей, изготовленных из модифицированного полиэтилентерефталата. Высота колонки составляла 25 см, внутренний диаметр – 10 см. На дно колонок помещали дренаж в виде полиэтиленовых гранул диаметром 4 мм, слив изолировали двойным слоем нетканого материала. В колонки вносили почву массой 1 кг таким образом, чтобы смоделировать пахотный слой толщиной 10 см. Над почвой в колонке оставляли запас свободного пространства для полива. На глубину 3 см в почву равномерно по срезу колонки вносили гранулы удобрения. Контролем служила

Таблица 1 / Table 1

Основные физико-химические показатели почвы
The main physical and chemical indicators of the soil

Показатель Indicator	Значение Value	Описание Description
pH _{KCl}	5,6±0,1	реакция близкая к нейтральной / reaction is close to neutral
pH _{H₂O}	6,5±0,1	нейтральная реакция / neutral reaction
C _{орг.} , % / C _{org.} , %	1,20±0,20	низкая обеспеченность для растений, малогумусная почва low supply for plants, low humus soil
NO ₃ ⁻ , мг/кг / mg/kg	2,60±0,30	низкая обеспеченность для растений / low supply for plants
P ₂ O ₅ , мг/кг / mg/kg	72,6±3,5	средняя обеспеченность для растений
K ₂ O, мг/кг / mg/kg	81±12	average supply for plants

Результаты и обсуждение

колонка без внесения удобрения. Сверху почву накрывали двойным слоем фильтровальной бумаги для равномерного распределения воды при поливе и исключения физического перемешивания почвы. Колонки закрепляли в штативе вертикально, сливом вниз.

Для достижения оптимальной влажности (50% от полной влагоёмкости) почву в каждой колонке однократно поливали дистиллированной водой путём разбрызгивания из пульверизатора. Далее с периодичностью в 24 ч десятикратно через колонки пропускали по 200 см³ дистиллированной воды. Каждый раз прошедшую через колонку воду с растворёнными в ней веществами собирали в ёмкость, измеряли её объём, фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента».

У полученных растворов в случае эксперимента с дистиллированной водой и фильтратов в опыте с почвой измеряли удельную электрическую проводимость с помощью кондуктометрического лабораторного анализатора жидкости «Мультитест КСЛ» (Семико НПП, Россия) согласно РД 52.24.495-2005; определяли концентрацию ионов калия, магния, аммония, нитрат-, сульфат- и фосфат-ионов на ионном хроматографе «Стайер» (НПК Аквилон, Россия) по ФР.1.31.2005.01724 и ФР.1.31.2008.01738. Пробы для хроматографического анализа предварительно фильтровали при помощи фильтрующей насадки на шприц Nylon с диаметром пор 0,45 мкм. Показатель точности ($P = 0,95$) при измерении массовой концентрации неорганических ионов составил 10–20%, удельной электропроводности – 5–10%.

Долю высвободившихся элементов питания из УКД (v , %) рассчитывали по формуле:

$$v = \frac{C \cdot V}{m} \cdot 100,$$

где C – концентрация питательных веществ в растворе, мг/мл; V – объём фильтрата, мл; m – количество питательных веществ в удобрении (по данным ионно-хроматографического анализа 3,00 г УКД), мг.

Обработку полученных данных проводили с использованием пакетов программы Microsoft Excel 2010. Для моделирования профиля высвобождения и вымывания элементов питания из УКД на основе полученных данных строили кривые, используя линейную и полиномиальную линии тренда. Степень соответствия трендовой модели исходным данным подтверждали путём расчёта коэффициента достоверности аппроксимации (R^2).

Опыт по исследованию профиля высвобождения элементов питания из УКД. Известно, что удельная электрическая проводимость водных растворов обусловлена ионами, образующимися при диссоциации электролитов. Соответственно, чем больше концентрация ионов в растворе, тем выше его электропроводность. В связи с этим удельная электрическая проводимость была выбрана в качестве показателя оценки в лабораторном испытании УКД.

С увеличением срока экспозиции УКД в дистиллированной воде фиксировали плановое увеличение значений удельной электропроводности растворов. При этом к концу срока наблюдения в исследуемой стационарной системе однозначного равновесного состояния, когда кривая электропроводности выходит на плато, не было установлено (рис. 2).

Согласно исходным данным по ионно-хроматографическому анализу УКД, содержание водорастворимых соединений магния, было меньше, чем аммония и калия в 3 и 4 раза соответственно.

Аналогичную зависимость наблюдали и на графике, построенном на основании данных, полученных в ходе исследования профиля высвобождения аналогичных катионов из удобрения в дистиллированную воду (рис. 3а). Однако на практике эта разница составила в среднем более, чем 10 раз. Данный факт можно объяснить разной природой ионов магния, аммония и калия. Кроме того, занижение установленных на практике значений концентрации ионов магния в исследуемом растворе, по сравнению с теоретически возможным значением, могло быть связано с отсроченной диффузией ионов магния из гранул УКД в воду.

С течением времени концентрация ионов магния в исследуемом растворе изменялась незначительно (31,6–52,4 мг/л), что на колонку составило 6,9–10,5 мг (рис. 3а). Замедление диффузии ионов из УКД в раствор могло быть связано с повышением их концентрации у поверхности гранул. Для других исследуемых катионов наблюдали тенденцию к увеличению их концентрации в растворе с течением времени. В среднем оно составило 1,6 раза от первоначальных значений. Профили высвобождения аммонийного азота и калия были схожи между собой, что не противоречило данным по их исходному содержанию в удобрении.

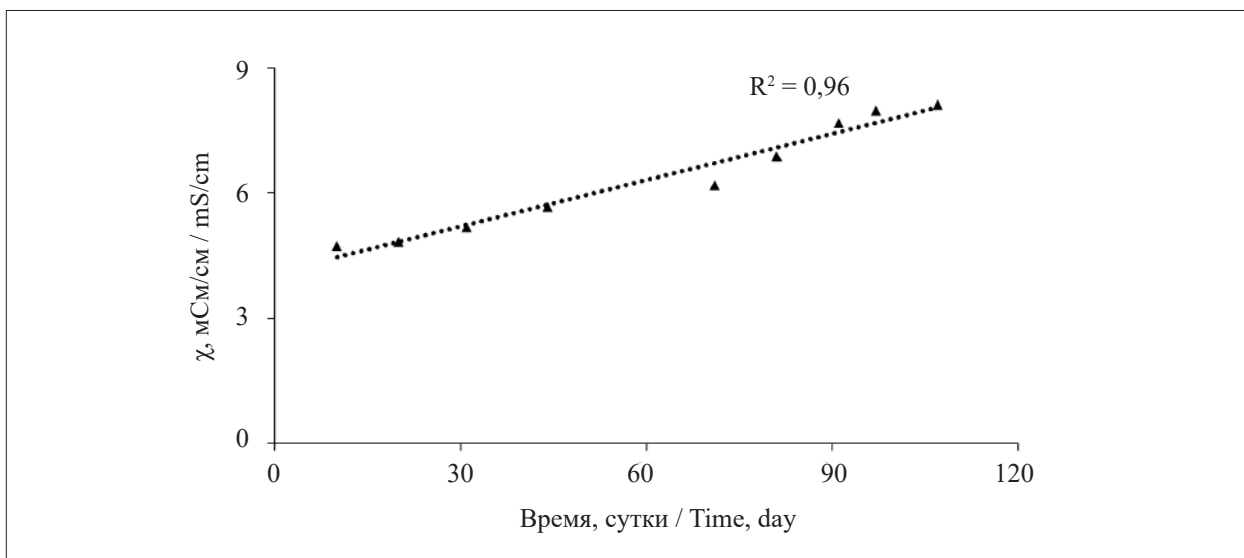


Рис. 2. Динамика удельной электропроводности воды при контакте с удобрением
 Fig. 2. Specific conductivity of water in contact with fertilizer in dynamics

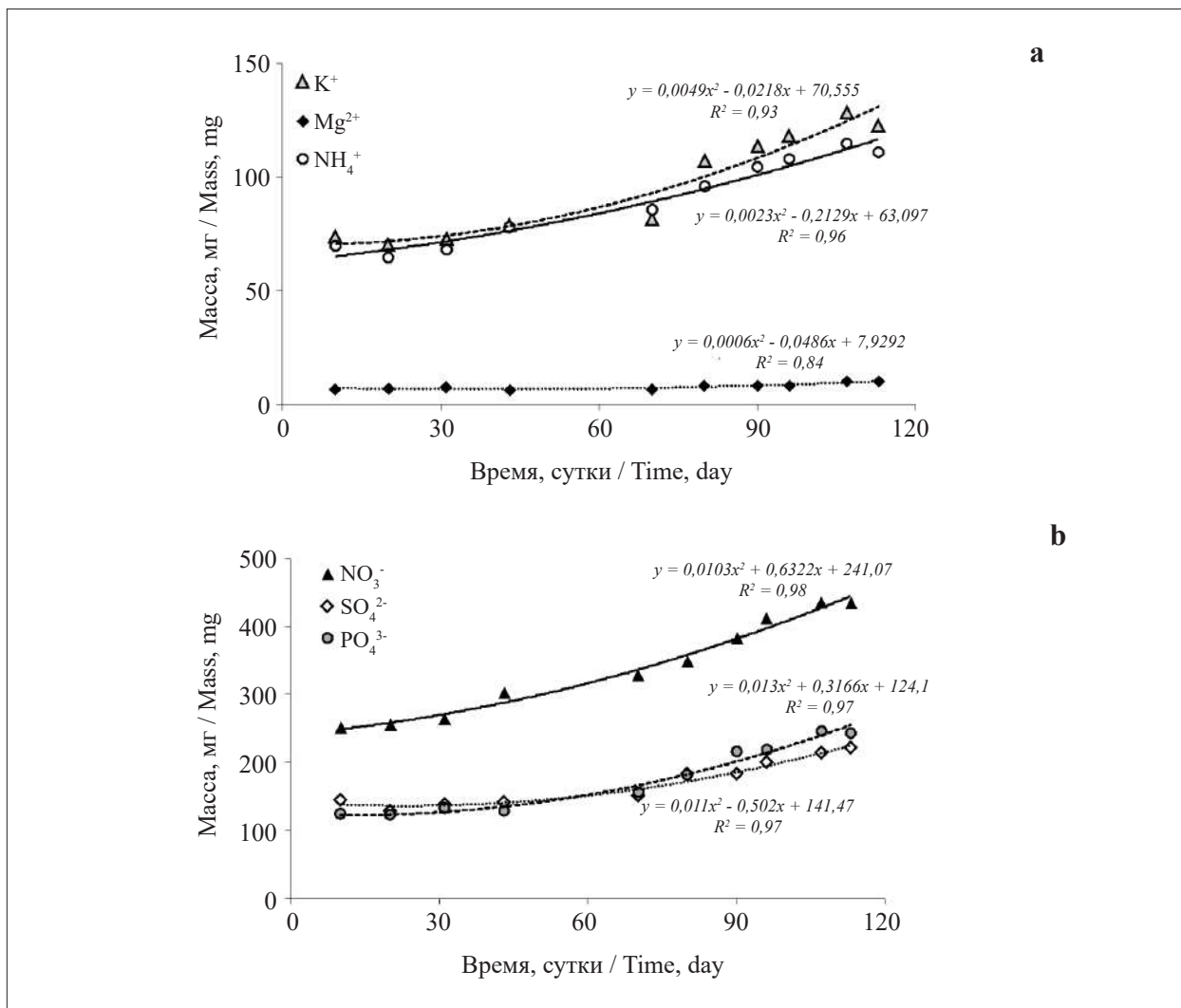


Рис. 3. Концентрация катионов (а) и анионов (б) в исследуемом растворе
 Fig. 3. The concentration of cations (a) and anions (b) in the test solution

Исследуемые анионы по их массовому содержанию в УЖД располагались в ряд: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{PO}_4^{3-}$. Аналогичным образом кривые высвобождения данных ионов располагались на графике, построенном по экспериментальным данным (рис. 3b). Профили высвобождения фосфат- и сульфат-ионов в исследуемом растворе были практически идентичны и отличались от профиля высвобождения нитрат-ионов. За исследуемый период времени увеличение концентрации ионов в растворе составило для SO_4^{2-} – 1,5; NO_3^- – 1,7; PO_4^{3-} – 1,9 раза.

В целом за период наблюдения (113 суток) доля высвободившихся элементов питания из УЖД в пересчёте на ионы составила (в % от внесённого с удобрением): PO_4^{3-} – 92,5; NO_3^- – 50,6; NH_4^+ – 48,8; K^+ – 41,8; SO_4^{2-} – 39,9; Mg^{2+} – 13,5. По результатам анализа фосфаты, содержащиеся в удобрении к этому сроку наблюдений практически высвободились.

Опыт по исследованию вымывания элементов питания из почвы при внесении УЖД. Значения электропроводности выщелоченных из почвы растворов в варианте опыта с удобрением с каждым проливом колонки дистиллированной водой изменялись нерегулярным образом (рис. 4). В контрольном варианте (почва без удобрения) максимальные значения электропроводности отмечали после двукратного пролива. В дальнейшем происходило снижение значений показателя, что свидетельствует о постепенном вымывании из почвы ионов легкорастворимых солей.

В целом за период наблюдения в варианте опыта с удобрением отмечали увеличение удельной электропроводности выщелоченных из почвы растворов. Рост значений электропроводности объясняется высвобождением растворимых компонентов из гранул удобрения, опосредованным процессами сорбции-десорбции в почвенной колонке.

В ходе изучения динамики вымывания элементов питания из почвы при внесении УЖД учитывали естественные процессы выщелачивания ионов из почвы. С каждым проливом колонки дистиллированной водой для расчёта массы вымытых элементов питания из почвы, в том числе с удобрением, учитывали объём фильтрата. Графики строили в виде накопительных кривых, отражающих количество вымытых элементов питания в пересчёте на соответствующий ион в г из колонки, по срокам наблюдения (рис. 5).

Согласно результатам эксперимента, профили вымывания катионов из почвы контрольной колонки и колонки с удобрением имели вид: $\text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$; анионов – $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{PO}_4^{3-}$ и были идентичны между собой. Обнаруживаемое содержание ионов калия в растворе было выше, чем других исследуемых катионов. Аналогичную зависимость наблюдали и в случае опыта с дистиллированной водой (рис. 3a). Массовая концентрация ионов аммония была ниже, чем ионов калия и магния (рис. 5c). Это может быть связано с процессами нитрификации, протекающими в условиях почвенной среды.

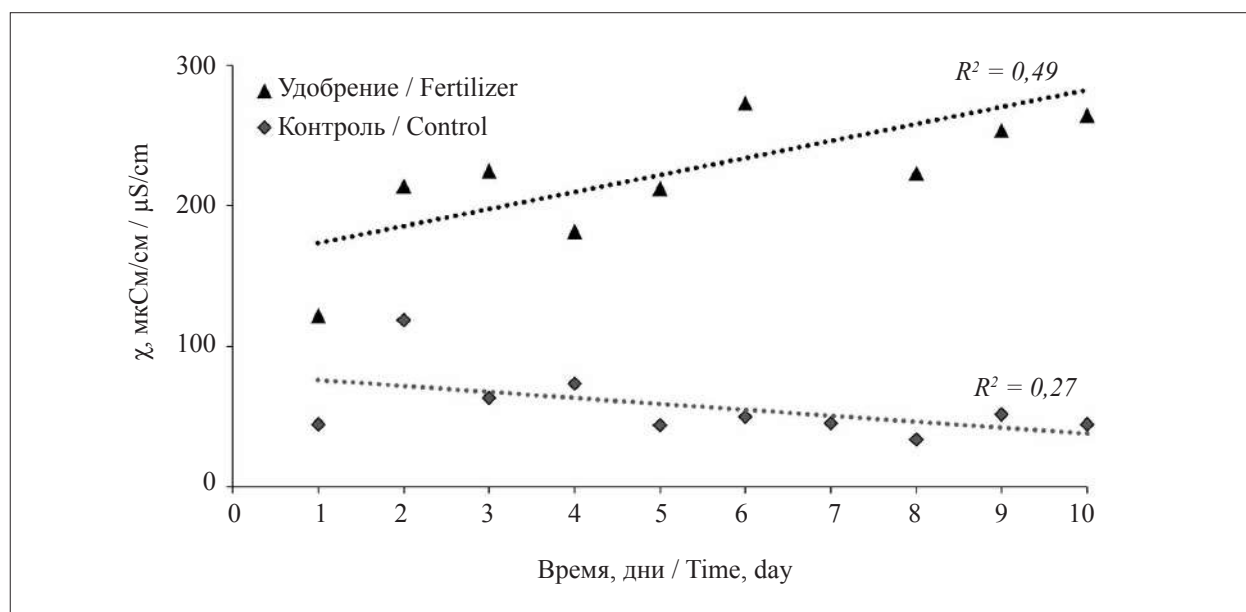


Рис. 4. Динамика удельной электропроводности выщелоченных из почвы растворов
 Fig. 4. Dynamics of specific electrical conductivity of solutions leached from soil

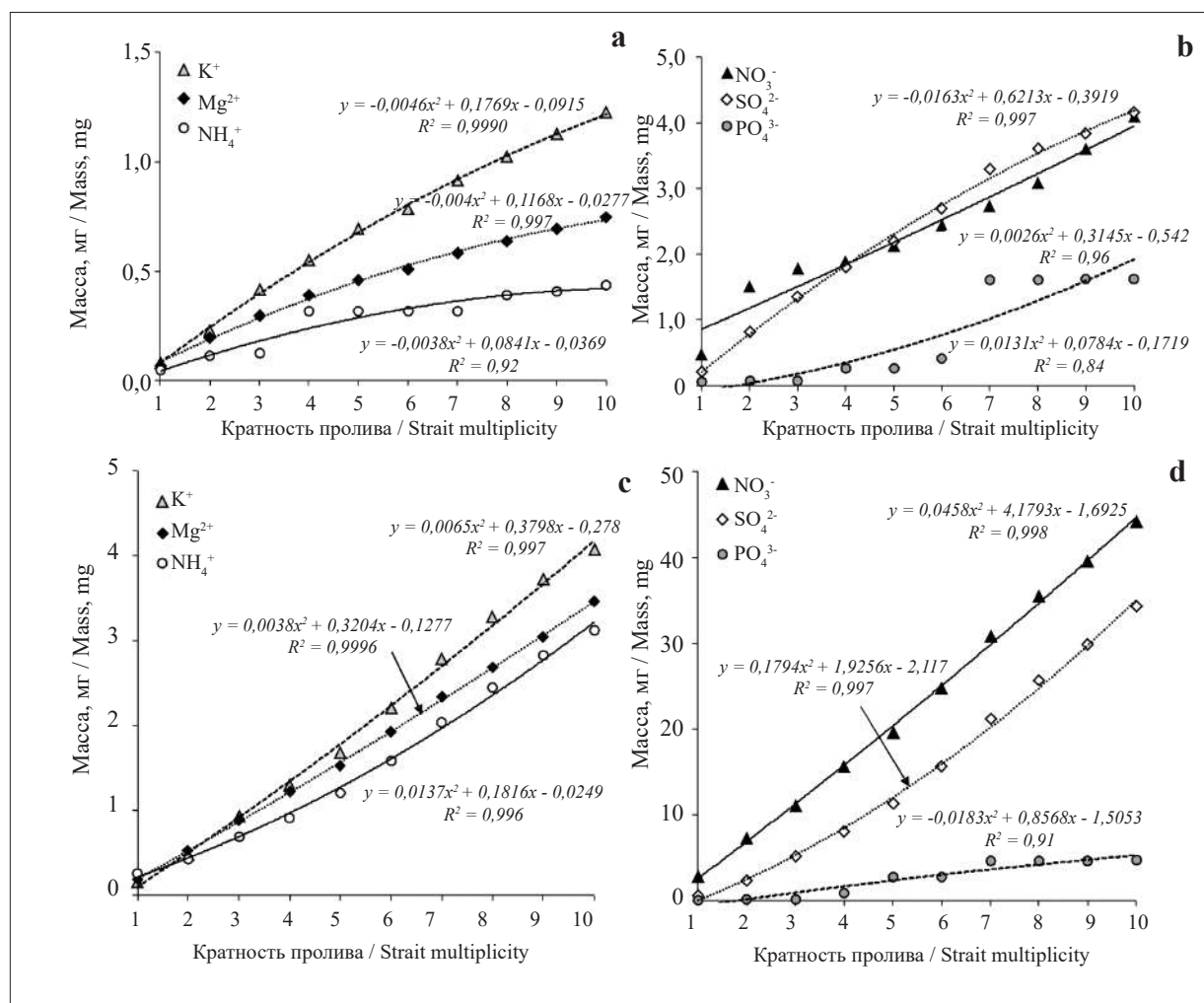


Рис. 5. Профили вымывания элементов питания из почвы в контрольной колонке (а, б) и колонке с удобрением (с, д) (по массе)

Fig. 5. Washout profiles of nutrients from soil in the control column (a, b) and the fertilizer column (c, d) (by mass)

Таблица 2 / Table 2

Коэффициент корреляции (R) между электропроводностью раствора и концентрацией исследуемых ионов / Correlation coefficient (R) between the electrical conductivity of the solution and the concentration of the studied ions

Среда, в которой находилось удобрение The environment in which the fertilizer was	Катионы / Cations			Анионы / Anions		
	K ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Вода / Water	+0,97	+0,89	+0,97	+0,99	+0,97	+0,99
Почва / Soil	+0,84	+0,91	+0,64	+0,83	+0,89	+0,27

Обнаруживаемое содержание фосфат-ионов в почвенном растворе было ниже, чем других исследуемых анионов, что согласуется с общеизвестными данными о малодоступных формах нахождения фосфора в почве (рис. 5д). В отличие от воды (рис. 5б), в почвенном растворе разница в содержании фосфат-ионов от других анионов была более выражена, что наглядно демонстрируют накопительные кривые по анионам (рис. 5д).

За десятикратный пролив колонки доля вымытых ионов из почвы с внесённым в неё

удобрением с учётом естественного выщелачивания составила (в % от внесённого с удобрением): SO₄²⁻ – 5,5; NO₃⁻ – 4,7; Mg²⁺ – 3,5; NH₄⁺ – 1,2; PO₄³⁻ – 1,2; K⁺ – 0,97.

В большинстве опытов наблюдалась высокая линейная корреляция между электропроводностью раствора экстрагированных компонентов удобрения и концентрациями отдельных ионов (в опыте с дистиллированной водой $R = +0,89$ – $+0,99$) (табл. 2). В опыте с почвой корреляция была ниже (в среднем $R = +0,83$ – $+0,91$), при этом для ионов аммония

и фосфат-ионов она была наиболее низкой, что, вероятно, обусловлено характером взаимодействия этих биофильных компонентов с почвенным поглощающим комплексом.

Заключение

С использованием кондуктометрического метода описан профиль высвобождения питательных веществ из УЖД в дистиллированной воде. Данные по электропроводности согласуются с результатами измерений массовых концентраций неорганических ионов методом ионной хроматографии. За 113 суток эксперимента с дистиллированной водой, в которую было помещено УЖД, доля высвободившихся ионов составила (в % от внесённого с удобрением): PO_4^{3-} – 92,5; NO_3^- – 50,6; NH_4^+ – 48,8; K^+ – 41,8; SO_4^{2-} – 39,9; Mg^{2+} – 13,5.

Установленные значения электропроводности выщелоченных из почвы растворов указывают на сложность процессов, происходящих в почве при внесении удобрений. Почва в отличие от дистиллированной воды является многокомпонентной системой, в которой действуют не только абиотические, но и биотические факторы. Наличие данного факта вносит свои коррективы в поведение химических соединений, в том числе агрохимикатов, в почве. При внесении УЖД в почву профиль вымывания катионов имел вид: $\text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$ и несколько отличался от профиля высвобождения катионов из УЖД в воде; анионов: $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{PO}_4^{3-}$. Массовая концентрация ионов аммония была ниже, чем ионов калия и магния. По нашему мнению, это могло быть связано с тем, что аммонийный азот, входящий в состав удобрений, способен трансформироваться в почве под действием микробиоты, и, соответственно, обнаруживаться в выщелоченном из почвы фильтрате в меньших концентрациях. В целом накопительные кривые, построенные по данным ионной хроматографии, характеризовали характер вымывания из почвы исследуемых неорганических ионов. За период наблюдений доля вымытых элементов питания в пересчёте на соответствующие ионы из удобрения в почве с учётом естественного выщелачивания составила (в % от внесённого с удобрением): SO_4^{2-} – 5,5; NO_3^- – 4,7; Mg^{2+} – 3,5; PO_4^{3-} – 1,2; NH_4^+ – 1,2; K^+ – 0,97.

Таким образом, при исследовании УЖД на предмет высвобождения элементов питания, наиболее информативными являются данные о содержании отдельных ионов, вы-

свободившихся в раствор. При этом построение накопительных кривых, полученных в ходе определения концентрации ионов в выщелоченных из почвы растворах, позволяет проводить лабораторную оценку профиля вымывания элементов питания из почвы при внесении УЖД.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» рег. № 1021051202042-2-1.6.19.

References

1. Kidin V.V., Shibalkin A.E., Kagirowa M.V. Imbalance of nutritional substances of the soil at the modern stage of development of agricultural production in Russia // Eurasian Journal of Soil Science. 2019. V. 8. No. 2. P. 167–175. doi: 10.18393/ejss.551268
2. Ashitha A., Rakhimol K.R., Jyothis M. Chapter 2 – Fate of the conventional fertilizers in environment // Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture. Academic Press, 2020. P. 25–39. doi: 10.1016/B978-0-12-819555-0.00002-9
3. Stekolnikov K.E. Organic farming in Russia – a boon or a disaster? // Biosfera. 2020. V. 12. No. 1–2. P. 53–62 (in Russian). doi: 10.24855/BIOSFERA.V.12I1.537
4. Mukhina M.T., Borovik R.A., Korshunov A.A. Fertilizers of prolonged action: the main stages and directions of development // Plodorodie. 2021. No. 4 (121). P. 77–82 (in Russian). doi: 10.25680/S19948603.2021.121.23
5. Lapteva E.M., Vinogradova Yu.A., Loskutov S.I., Puhalsky Ya.V., Perminova E.M., Kovaleva V.A., Chebotarev N.T. Influence of organic fertilizers on the structure and composition of soil microbial communities in agrocenoses of the middle taiga (on the example of the Komi Republic) // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 168–175 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-168-175
6. Nooeaid P., Chuysinuan P., Pitakdantham W., Aryuwananon D., Techasakul S., Dechtrirat D. Eco-friendly polyvinyl alcohol/polylactic acid core/shell structured fibers as controlled-release fertilizers for sustainable agriculture // J. Polym. Environ. 2021. V. 29. P. 552–564. doi: 10.1007/s10924-020-01902-9
7. Deng F., Li W., Wang L., Hu H., Liao S., Pu S.L., Tao Y.F., Li G.H., Ren W.J. Effect of controlled-release fertilizers on leaf characteristics, grain yield, and nitrogen use efficiency of machine-transplanted rice in southwest China // Archives of Agronomy and Soil Science. 2021. V. 67. No. 13. P. 1739–1753. doi: 10.1080/03650340.2020.1807519
8. Wei H.Y., Chen Z.-F., Xing Z.P., Zhou L., Liu Q.Y., Zhang Z.Z., Jiang Y., Hu Y.J., Zhu J.Y., Cui P.Y., Dai Q.G., Zhang H.C. Effects of slow or controlled release fertilizer

- types and fertilization modes on yield and quality of rice // *Journal of Integrative Agriculture*. 2018. V. 17. No. 10. P. 2222–2234. doi: 10.1016/S2095-3119(18)62052-0
9. Vejan P., Khadiran T., Abdullah R., Ahmad N. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture // *Journal of Controlled Release*. 2021. V. 339. P. 321–334. doi: 10.1016/j.jconrel.2021.10.003
10. Mukhina M.T., Borovik R.A., Korshunov A.A. Fertilizers of prolonged action: the main stages and directions of development // *Plodorodie*. 2021. No. 4 (121) [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/udobreniya-prolongirovannogo-deystviya-osnovnyye-etapy-i-napravleniya-razvitiya> (Accessed: 28.09.2024).
11. Zhang S., Yang Y., Gao B., Li Y.C., Liu Z. Superhydrophobic controlled-release fertilizers coated with bio-based polymers with organosilicon and nano-silica modifications // *Journal of Materials Chemistry A*. 2017. V. 5. No. 37. P. 19943–19953. doi: 10.1039/C7TA06014A
12. Dong L., Changwen D., Fei M., Yazhen S., Ke W., Jianmin Z. Interaction between polyacrylate coatings used in controlled-release fertilizers and soils in wheat-rice rotation fields // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2019. V. 286. Article No. 106650. doi: 10.1016/j.agee.2019.106650
13. Fertahi S., IIsouk M., Zeroual Y., Oukarroum A., Barakat A. Recent trends in organic coating based on biopolymers and biomass for controlled and slow release fertilizers // *Journal of Controlled Release*. 2021. V. 330. P. 341–361. doi: 10.1016/j.jconrel.2020.12.026
14. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. Encapsulation of granules in polymer shells as a method for creating mineral fertilizers with a controlled release rate of nutrients // *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie*. 2017. No. 3 (51). P. 86–91 (in Russian).
15. Mikula K., Izydorczyk G., Skrzypczak D., Mironiuk M., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Controlled release micronutrient fertilizers for precision agriculture – A review // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 712. Article No. 136365. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136365
16. Jia C., Zhang M., Lu P. Preparation and characterization of polyurethane-/MMT nanocomposite-coated urea as controlled-release fertilizers // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2020. V. 59. No. 9. P. 975–984. doi: 10.1080/25740881.2020.1719136
17. Lucero-Acuna A., Guzman R. Nanoparticle encapsulation and controlled release of a hydrophobic kinase inhibitor: Three stage mathematical modeling and parametric analysis // *International Journal of Pharmaceutics*. 2015. V. 494. No. 1. P. 249–257. doi: 10.1016/j.ijpharm.2015.07.049
18. Irfan S.A., Razali R., Shaari K.Z.K., Mansor N., Azeem B., Versypt A.N.F. A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers // *Journal of Controlled Release*. 2018. V. 271. P. 45–54. doi: 10.1016/j.jconrel.2017.12.017
19. Lawrence D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang S.Y. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release // *Plants*. 2021. V. 10. No. 2. Article No. 238. doi: 10.3390/plants10020238
20. Jamnongkan T., Kaewpirom S. Potassium release kinetics and water retention of controlled-release fertilizers based on chitosan hydrogels // *Journal of Polymers and the Environment*. 2010. V. 18. P. 413–421. doi: 10.1007/s10924-010-0228-6
21. Osmokote. Osmokote Exakt Standard 5–6 months (15–9–12+2MGO+TE) – Osmocote Exact Standard, Netherlands [Internet resource] <https://xn--24-1lchjbbun.xn--p1ai/products/standart-15-9-12> (Accessed: 28.09.2024).
22. Flaten P.L., Karamanos R.E., Walley F.L. Mobility of copper from sulphate and chelate fertilizers in soils // *Canadian Journal of Soil Science*. 2004. V. 84. No. 3. P. 283–290. doi: 10.4141/S03-070