

УДК 631.416.4:631.445.24:631.82

МИГРАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ Al, Mn И Fe В МЕЛИОРИРОВАННЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ¹

© 2021 г. А. В. Литвинович^{1,*}, О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев², А. А. Белимов³¹ Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия² Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии
196608 С.-Петербург—Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия

*E-mail: a.v.lavrishchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.

После доработки 05.05.2020 г.

Принята к публикации 13.10.2020 г.

В лабораторных опытах на колонках, проведенных на дерново-подзолистых почвах, мелиорируемых различными по размеру частицами доломита в научно обоснованной дозе (1.0 H_T) и конверсионным мелом (КМ) в заведомо завышенной дозе (2.5 H_T), изучен состав органо-минеральных комплексов (ОМК), мигрирующих из пахотного горизонта. Вне зависимости от количества и состава известкового материала, использованного в опытах, содержание углерода в ОМК менялось от 5.5 до 5.7%. Показатель оптической плотности ($E_c^{mg/ml}$) изменялся в диапазоне величин, характерных для фульвокислот (ФК) от 2.7 до 3.1. Усредненными основаниями ФК сохраняли способность оказывать разрушительное влияние на почвенные минералы, переводя в раствор значительное количество Al, Mn и Fe. Подзолообразование в мелиорируемых почвах не прекращалось. По способности к миграции в составе ОМК, осаждаемых щелочью, изученные элементы в опыте с доломитовыми частицами выстраивались в следующий по убыванию ряд: Mn > Al > Fe, в опыте с КМ, примененном в заведомо завышенной дозе: Al > Mn > Fe. Количество мигрирующего марганца в опыте с доломитовыми частицами было в 15.8–32.1 раза больше, чем алюминия и в 7.7–8.0 раза больше, чем железа. В опыте с КМ количество мигрирующего алюминия превосходило содержание мигрирующих железа и марганца соответственно в 2.8 и 1.9 раза.

Ключевые слова: известкование почв, миграция, алюминий, марганец, железо, органо-минеральные комплексы, кислотный гидролиз минералов, подзолообразование.

DOI: 10.31857/S0002188121010075

ВВЕДЕНИЕ

Водорастворимые органические вещества (ВОВ) — неотъемлемая часть почвы. ВОВ диагностируются в корневых выделениях растений, активно формируются при разложении корневых и пожнивных остатков, являются одной из форм превращения гумусовых веществ. В составе гумуса доля ВОВ меняется от 0.05 до 1% [1].

Экспериментально установлено, что ВОВ дерново-подзолистых почв представлены фульвокислотами (ФК) с различной молекулярной массой, веществами фенольной или полифенольной природы, низкомолекулярными органическими

кислотами, полисахаридами, аминокислотами [2]. На долю ФК приходится до 80% всех ВОВ [3].

Многочисленные данные литературы свидетельствуют о способности ВОВ образовывать с ионами алюминия, марганца и железа устойчивые соединения комплексной природы. Между кислотностью почв и мобилизацией алюминия и железа из кристаллической решетки минералов существует тесная корреляционная связь [4].

Образование устойчивых к разложению водорастворимых органо-минеральных соединений, наряду с систематическим промачиванием почвенной толщи атмосферными осадками, играет решающую роль в развитии элювиально-иллювиального профиля почв подзолистого типа. Глав-

¹ Анализ содержания элементов в осадках выполнен при поддержке Российского Научного Фонда (грант 19-16-00097).

ная роль в миграционных процессах, происходящих в подзолистых почвах, принадлежит соединениям фульвокислотной природы, которые активно участвуют в перемещении алюминия, марганца и железа в их профиле. Передвижение алюминия и железа в форме молекулярно-растворимых комплексных органо-минеральных соединений в работе [5] считали основной формой миграции при подзолообразовании.

В почвах подзолистого типа **ФК** представлены двумя большими группами: кислоторастворимой фракцией, переходящей в раствор разбавленной H_2SO_4 (или HCl) – фракция **1a (ФК-1a)** по И.В. Тюрину [6]. Другая фракция (**ФК-1**) непосредственно в кислотах не растворяется. Она переходит в раствор 0.1 н. $NaOH$ вместе с гуминовыми кислотами (**ГК**) и остается в кислотном фильтрате при осаждении **ГК**.

При избытке оснований в почвенном растворе и доведении последнего до щелочной реакции ($pH > 10$) в осадок выпадают **ОМК** с **ФК-1** [6, 7]. Показано, что масштаб миграции оснований Ca , Mg и Sr в составе **ОМК** мелиорируемой отсевом доломита дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы весьма значителен. Элювиальные потери зависели от размера частиц мелиоранта [8].

В исследованиях [9] за один год вынос углерода **ФК** из пахотного горизонта дерново-подзолистой почвы мощностью 13 см достигал 280–310 кг/га, а **ФК** прочно связывали до 51.4% внесенных катионов Ca в растворимые кальций-фульватные соединения, способные к миграции по профилю почвы.

Известкование оказывает длительное и всестороннее влияние на все компоненты почвы. Снижается уровень реакции, уменьшается содержание легкоподвижных форм алюминия, марганца и железа, увеличиваются запасы катионов кальция и магния [10–13].

С увеличением pH почвенного раствора за счет известкования растет и емкость катионного обмена (**ЕКО**) почвы. По мнению авторов работы [14], при доведении pH почвенных растворов до 6.0–7.0 в составе гумусовых кислот могут активизироваться все новые реактивные группы, которые до этого были блокированы внутренними химическими связями или не могли быть активированы при более низких величинах pH растворов. В опытах [12] при однократном внесении известии по 1 H_r за счет вовлечения в процессы обмена слабодиссоциированных позиций **ОВ** почвы емкость катионного обмена возросла на 10–15%, при периодическом известковании по 1 H_r – на 23–29%. По данным авторов, в результате известкования **ЕКО** может возрасти до 48%.

Это создает возможность для взаимодействия “свободных” функциональных групп гумусовых кислот известкованных почв с другими типоморфными элементами. В лабораторном опыте [14] установлено, что после усреднения кальцием части функциональных групп **ФК** они способны принимать участие в разложении силикатных минералов и вступать во взаимодействие с железом и алюминием. Однако степень разложения силикатных минералов **ФК**, усредненных кальцием, по сравнению со “свободными” **ФК**, снижается в 5 раз.

Согласно [12], в известкованных почвах реально существуют не **ФК**, а их соли, у которых ≈85–90% кислых функциональных групп замещено щелочноземельными основаниями и другими металлами. Исследования, направленные на установление подвижности типоморфных элементов алюминия, марганца и железа в составе **ОМК** почв, известкованных нетрадиционными мелиорантами, нам неизвестны.

Цель работы – в лабораторных опытах на колонках установить масштабы миграции Al , Mn и Fe в составе **ОМК** дерново-подзолистых почв, мелиорированных отходами промышленного производства.

В задачи исследования входило: установить содержание углерода в **ОМК**, удаляемых при промывании известкованных почв, определить оптическую плотность растворов **ОМК**, выпадавших в осадок при доведении pH элюатов до 13 ед., провести ранжирование типоморфных элементов по их способности вступать в соединения с **ВОВ**, мигрирующих в мелиорируемых почвах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выполнения поставленной цели были проведены 2 лабораторных опыта. Образцы для выполнения лабораторных опытов отбирали пробы почвы на делянках микрополевого опыта (опыт 1) и из сосудов вегетационного опыта (опыт 2).

Образцы мелиорированных почв высушивали, размалывали, просеивали через сито с отверстиями 1 мм и помещали в полиэтиленовые колонки диаметром 65 мм. Масса почвы в колонке 800 г. Высота почвенного слоя 18 см. Плотность набивки 1.0–1.1 г/см³. Повторность шестикратная. Почву в колонках насыщали деионизированной водой до первой капли просочившейся влаги. Далее проводили промывание, используя 400 мл воды. Фильтрат после промывания собирали в колбу.

В элюаты добавляли 0.1 н. $NaOH$, доводя pH до 13 ед. При достижении заданной величины pH в осадок выпадали бурые хлопья **ОМК**, которые от-

Таблица 1. Валовой химический состав почв, использованных в опыте, % на бескарбонатную и безгумусную навеску

| Образец | Потеря при прокаливании | SiO ₂ | R ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | P ₂ O ₅ | SO ₃ | MnO |
|---------------|-------------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------------------|-----------------|------|
| Почва опыта 1 | 5.12 | 81.2 | 10.6 | 2.31 | 8.96 | 0.37 | 0.39 | 0.09 | 0.63 | 0.52 |
| Почва опыта 2 | 6.15 | 81.1 | 9.3 | 1.19 | 7.97 | 0.44 | 0.47 | 0.11 | 0.51 | 1.50 |

деляли от надосадочной жидкости, высушивали и анализировали, устанавливая содержание $C_{орг}$, $E_c^{мг/мл}$ и наличие Al, Mn и Fe.

Образцы почвы для проведения опыта 1 отбирали на делянках микрополевого опыта спустя 1 год после известкования после уборки гороха (*Pisum sativum*). Опыт заложен в 2015 г. с целью установления мелиоративных свойств отсева доломита, используемого для дорожного строительства. Размер частиц доломита 5–7 и 7–10 мм. Методика проведения исследований подробно описана в работах [15–17]. Повторность четырехкратная. Схема опыта приведена в табл. 1. Доза применения мелиоранта рассчитана по гидролитической кислотности. В качестве варианта сравнения использовали доломитовую муку (ДМ), приготовленную из отсева, пропущенного сквозь сито с отверстиями 0.25 мм. Дополнительно в схему опыта включен вариант с естественной смесью частиц отсева (ЕСМ). Гранулометрический состав отсева приведен в работе [16]. В составе доломита содержание CaCO₃ – 46.1, MgCO₃ – 38.4%.

В опыте использовали дерново-подзолистую легкосуглинистую почву: рН_{KCl} 4.6, H_T – 4.9 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 2.18%. Содержание частиц <0.01 мм – 21.4%. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 1.

В опыте 2 устанавливали состав ОМК, мигрирующих из кислой дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорированной конверсионным мелом (КМ), в количестве, соответствующем 2.5 H_T . Содержание CaCO₃ в меле равно 90%. Образцы почвы отбирали из сосудов вегетационного опыта спустя 5 лет после мелиорации. Для проведения вегетационного опыта использовали кислую дерново-подзолистую почву: рН_{KCl} 4.1, H_T – 5.4 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 3.02%. Содержание частиц <0.01 мм – 18.6%. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 1. Условия проведения эксперимента подробно описаны в работах [18–21].

Определение углерода в составе осадков проводили по методу Тюрина, основанном на окислении гумуса серно-хромовой смесью в соотношении 1 : 1. Оптическую плотность ОМК измеряли на ФЭК, предварительно растворяя осадок в

0.1 н. NaOH. Использовали методику Плотниковой–Пономаревой [22]. Длина волны 430 нм, толщина кюветы 1 см.

Содержание Al, Mn и Fe в осадках устанавливали с помощью эмиссионного спектрофотометра ICPE-9000 (Shimadzu, Япония) по методике производителя. Для этого образцы измельчали и озоляли в смеси концентрированных HNO₃ и 38% H₂O₂ (1 : 1) при 70°C с использованием системы DigiBlock (LabTech, Италия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что известкование привело к снижению рН_{KCl} почвы в опыте 1 уже в год известкования (табл. 2). Максимальный эффект от применения был достигнут в вариантах опыта с использованием ДМ, естественной смеси фракций доломита и частиц размером 7–10 мм. Существенных различий величины рН_{KCl} в этих вариантах выявлено не было (рН_{KCl} установился на уровне 5.6–5.7 ед.). Почва в результате мелиорации перешла из категории “среднекислой” в категорию “близкой к нейтральной”. Эффект от использования частиц размером 5–7 мм был меньше (рН_{KCl} 5.3). Почва характеризовалась как “слабокислая”.

Считается установленным, что при равных дозах применения известкового материала мелиоративный эффект зависит от размера частиц [23]. Чем мельче гранулы и больше площадь поверхности соприкосновения их с почвой, тем мелиоративный эффект больше. Растворение крупных частиц происходит за счет контактного обмена их внешних слоев и почвы.

В наших исследованиях использование частиц доломита размером 7–10 мм в год применения оказалось эффективнее, чем фракции размером 5–7 мм. Вероятно, в данном случае решающую роль оказала различная степень выветрелости поверхности частиц размером 5–7 и 7–10 мм. Длительное нахождение в отвалах способствовало ослаблению кристаллизационных связей между молекулами доломита, расположенными на внешней поверхности частиц. Под действием климатических факторов поверхность частиц приобрела определенную рыхлость. При попадании в почву рыхлые внешние слои энергично рас-

Таблица 2. Состав органо-минеральных комплексов, вымываемых из мелиорируемых Umbric Albeluvisol Abruptic

| Вариант | рН _{КС1} | С _{общ} , % | Е _с ^{мг/мл} | Содержание металлов, мг/кг | | | |
|--|-------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------|--------------|--------------|
| | | | | Al | Fe | Mn | Сумма |
| Опыт 1 (мелиорант – доломитовая крошка) | | | | | | | |
| 1. НРК (фон) + + Доломит (Д) < < 0.25 мм (1 Н _г) | 5.7 ± 0.1 b | 5.60 ± 0.04 b | 3.1 ± 0.3 a | 1330 ± 40 b | 167 ± 3 a | 2640 ± 4 b | 4140 ± 40 b |
| 2. Фон + Д 5–7 мм (1 Н _г) | 5.3 ± 0.1 a | 5.69 ± 0.01 c | 2.7 ± 0.1 a | 3970 ± 10 e | 496 ± 3 d | 18716 ± 95 e | 2320 ± 90 a |
| 3. Фон + Д 7–10 мм (1 Н _г) | 5.6 ± 0.1 b | 5.59 ± 0.01 b | 2.9 ± 0.1 a | 3250 ± 10 d | 424 ± 4 c | 13635 ± 23 d | 17400 ± 30 d |
| 4. Фон + ЕСМ (1 Н _г) | 5.7 ± 0.1 b | 5.51 ± 0.01 a | 2.8 ± 0.1 a | 1860 ± 4 c | 359 ± 6 b | 4356 ± 10 c | 6580 ± 6 c |
| Опыт 2 (мелиорант – конверсионный мел) | | | | | | | |
| 1. НРК (фон) + КМ (2.5 Н _г) | 6.3 ± 0.1 c | 5.50 ± 0.02 a | 3.0 ± 0.3 a | 1690 ± 10 a | 605 ± e | 903 ± 7 a | 3200 ± 30 |

Примечания. 1. Указаны средние величины и (±) – стандартные ошибки средних ($n = 3$). 2. Разные латинские буквы указывают на достоверные различия между вариантами по критерию наименьшей средней разницы (НСР) Фишера ($P < 0.01$).

творялись. Причем скорость взаимодействия частиц с почвой будет определяться степенью выветренности, которая, вероятно, и обусловила различия в мелиоративном эффекте от применения частиц различного размера. Для более точного ответа на этот вопрос нужны микроморфологические исследования поверхности гранул.

В опыте 2 спустя 5 лет после известкования и помещения в колонки рН_{КС1} почвы был близок к нейтральному (рН_{КС1} 6.3). Следовательно, использованные в опытах отходы промышленности обладали значительным мелиоративным эффектом.

Содержание С_{орг}, мигрирующего в мелиорированной частицами доломита почве в составе ОМК (опыт 1), изменялось в зависимости от варианта опыта – от 5.5 до 5.7%. Размер частиц доломита не повлиял на миграционную подвижность С_{орг}. Отличия между вариантами опыта были недостоверными. В опыте с применением КМ количество С_{орг} в составе ОМК практически не отличалось от количества С_{орг} в составе ОМК опыта с доломитовой крошкой (С_{орг} = 5.5%). Таким образом, удаляемые при промывании ОМК содержали равное количество С_{орг}.

Физико-химический смысл показателя Е_с^{мг/мл} (оптической плотности) можно определить как интенсивность окрашивания щелочного раствора органических веществ на единицу углерода. Чем более темную окраску имеет раствор, тем больше в нем содержится С_{орг}. При равной концентрации С_{орг} показатель Е_с^{мг/мл} зависит от глущины гумификации (ароматизации) находящихся в растворе гумусовых веществ.

Установлено, что оптическая плотность ФК укладывалась в диапазон от 1 до 4 ед. [24]. В наших исследованиях величина Е_с^{мг/мл} ОМК в опыте с частицами доломита менялась от 2.7 до 3.1 ед. В опыте с КМ Е_с^{мг/мл} = 3. Это целиком соответствовало величине оптической плотности ФК. Таким образом, можно считать установленным, что ОМК, мигрирующие при промывании мелиорируемых почв и способные осаждаться при щелочной реакции, представлены ФК.

Доказано, что подвижность алюминия в почвах при химической мелиорации уменьшается вследствие осаждения алюминия в виде малоподвижного гидроксида алюминия. В опытах [12] известкование дозой известия, эквивалентной 1 Н_г, привело к возрастанию рН_{КС1} до 5.5–5.6 и снижению содержания подвижного алюминия почти до нуля. В наших исследованиях при известковании доломитовыми частицами и доведении рН_{КС1} почвы опыта 1 до 5.3–5.7 ед. и рН_{КС1} 6.3 ед. При известковании КМ почвы опыта 2 алюминий активно перемещался в составе ОМК. Масштаб миграции в опыте 1 зависел от размера частиц. По количеству алюминия, удаляемого при миграции ОМК, все изученные варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: частицы размером 5–7 мм > 7–10 мм > ЕСМ > частицы < 0.25 мм. По сравнению с вариантами, мелиорированными доломитовой крошкой размером 5–7 и 7–10 мм, применение тонко измельченного доломита (< 0.25 мм) снижало миграционную подвижность алюминия в 2.98 и 2.44 раза соответственно. При использовании доломитовой крошки без разделения на фракции

элювиальные потери алюминия по сравнению с вариантом, мелиорированным ДМ, возросли в 1.4 раза. Количество мигрирующего алюминия в составе ОМК опыта 2 с КМ было больше, чем в варианте с доломитовой мукой, и меньше, чем в варианте с ЕСМ в опыте 1. Следовательно, вне зависимости от вида мелиоранта, дозы его применения и тонины помола определенное количество кислых функциональных групп гумусовых кислот мелиорированных дерново-подзолистых почв остается не усредненной и способно связывать алюминий в составе ОМК.

Подзолистые и дерново-подзолистые почвы Северо-Запада России характеризуются очень большими валовыми запасами марганца. По данным [25], оно изменяется от 0.03 до 0.5% от массы почвы. В зависимости от гранулометрического состава, степени выветрелости минералов в легкоподвижные (доступные для растений формы) переходит от 0.1 до 1% валового содержания этого элемента. При кислой реакции подвижность марганца в почвах возрастает и происходит более интенсивное поглощение этого элемента растениями. В литературе встречаются многочисленные свидетельства об изменении содержания подвижных форм этого элемента под действием химической мелиорации почв [26, 27]. В отличие от алюминия максимальное снижение подвижности марганца отмечено при более высоких показателях pH_{KCl} 6.5–7.2 [12].

Из всех типоморфных элементов, изученных в наших опытах, количество марганца, мигрирующего в составе ОМК, было наибольшим. В зависимости от варианта опыта изменения составили от 2640 до 18700 мг/кг. Это в 1.98–4.71 раза больше количества алюминия, связанного в составе ОМК и удаляемого при промачивании мелиорируемой почвы в опыте 1. Количество мигрирующего марганца в опыте 2 было в 1.88 раза меньше, чем алюминия.

Минимальное количество марганца установлено в составе ОМК, мигрирующих в варианте с применением ДМ, максимальное – в варианте с применением частиц размером 5–7 мм. Разница составила 7.1 раза. Следовательно, тонина помола также оказывает существенное влияние на масштаб миграции марганца из почвы, мелиорируемой равными дозами доломита. При этом влияние степени измельчения доломита на количестве связанного в составе ОМК марганца сказывалось значительно сильнее, чем алюминия. По количеству мигрирующего марганца изученные варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: частицы размером 5–7 мм > 7–10 мм > ЕСМ > частицы размером <0.25 мм. Выявленная картина с точностью повторила законо-

мерность, установленную при анализе данных о содержании мигрирующего в составе ОМК алюминия.

Верхние горизонты подзолистых и дерново-подзолистых почв Северо-Запада Нечерноземной зоны России содержат очень большое количество валового железа. Оно меняется от 0.7 до 5.0% и больше к массе почвы. В зависимости от минералогического состава, степень разрушенности почвенных минералов в легкоподвижные (доступные для растений формы) переходит от 0.01 до 1% общего содержания этого элемента [12].

Состояние железа в почвах изучено достаточно полно [27–30]. Подвижность железа возрастает от почв с щелочной реакцией к нейтральной и далее к кислым почвам. Известкование приводит к уменьшению концентрации подвижного железа в почвах. Максимальное снижение подвижности этого элемента отмечено при pH_{KCl} 6.5–7.2 [12].

Мигрирующие ОМК из всех изученных в наших опытах элементов содержали наименьшее количество железа. В зависимости от варианта опыта это количество было в 7.7–8.0 раза меньше, чем алюминия, и в 15.8–32.1 раза меньше, чем марганца. Тонина помола доломита также повлияла на масштаб миграции железа. В опыте 1 количество вымытого железа изменялось от 167 (вариант с ДМ), до 496 мг/кг (вариант с частицами размером 5–7 мм). Разница составила 2.97 раза.

По количеству удаляемого железа все изученные варианты выстраивались в следующий по убыванию ряд: частицы размером 5–7 мм > 7–10 мм > смесь фракций > частицы размером <0.25 мм, т.е. целиком повторяли закономерности, выявленные при анализе данных содержания Al и Mn, мигрирующих в составе ОМК.

Вне зависимости от варианта опыта 1 мигрирующие типоморфные элементы образовывали следующий по убыванию ряд: Mn > Al > Fe. В опыте 2 содержание вымытого в ОМК Al превосходило содержание Fe и Mn соответственно в 2.8 и 1.87 раза.

В работе [8] установлено, что ФК, мигрирующие в составе ОМК мелиорированных дерново-подзолистых почв, связывают большое количество Ca, Mg и Sr. Чем тонина помола доломита меньше, тем больше щелочноземельных металлов мигрировало в составе ОМК. В зависимости от варианта опыта (опыт 1 настоящего исследования) изменения их суммарного содержания составили от 191 до 319 г/кг осадка. Проведенное исследование показало, что усредненные основаниями ФК сохраняют “агрессивность” по отношению к почвенным минералам, переводя в раствор значительное количество Al, Mn и Fe. Чем больше размер частиц мелиоранта, меньше вы-

ветрелость поверхности их частиц и меньше оснований Са, Mg и Sr содержат ОМК, тем “агрессивность” ФК больше. Связь между общим количеством вымываемых Са, Mg и Sr в составе ОМК и суммой Al, Mn и Fe, мигрировавших в опыте 1, была слабая отрицательная: $r = -0.2$. При этом даже применение заведомо завышенной дозы КМ ($2.5 H_r$) и доведение pH_{KCl} почвы практически до нейтрального уровня (pH_{KCl} 6.3) не устраняло разрушения минералов.

Следовательно, процессы кислотного гидролиза (подзолаобразования) в мелиорируемых почвах не прекращаются. Известкование не устраняет влияние природно-климатических факторов на процессы формирования гумуса. Образующиеся гумусовые кислоты остаются кислыми и даже после нейтрализации известковыми мелиорантами части функциональных групп оказывают разрушительное действие на почвенные минералы.

ВЫВОДЫ

1. Содержание углерода, мигрирующего в составе ОМК в дерново-подзолистых мелиорированных почвах, менялось от 5.5 до 5.7%. Показатели величины оптической плотности ОМК укладывались в диапазон, характерный для фульвокислот ($E_c^{mg/ml} = 2.7-3.1$).

2. Процессы кислотного гидролиза минералов в известкованных почвах не прекращаются. Суммарное количество вымываемых Al, Mn и Fe в составе ОМК зависело от размера частиц мелиоранта, выветрелости поверхности его частиц и содержания в ОМК щелочноземельных металлов. Связь между общим количеством вымываемых Са, Mg и Sr в составе ОМК и суммой Al, Mn и Fe, мигрировавших в опыте 1, была слабая отрицательная: $r = -0.2$. Изменения суммарного содержания типоморфных элементов в составе ОМК в различных вариантах опыта с доломитовыми частицами составили от 2320 до 13400 мг/кг. В опыте с КМ они были равны 3200 мг/кг.

3. Вне зависимости от варианта опыта с доломитовыми частицами мигрирующие типоморфные элементы образовывали следующий по убыванию ряд: $Mn > Al > Fe$. Содержание элювируемого марганца в 7.7–8.0 раза превосходило количество вымываемого алюминия и в 15.8–32.1 раза – количество мигрирующего железа. В опыте с КМ содержание вымытого алюминия в составе ОМК превосходило содержание Fe и Mn в 2.8–1.87 раза соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalbitz K., Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008. V. 171. № 1. P. 52–60.
2. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.П., Евсеева Р.М. О содержании и формах водорастворимых соединений алюминия в почвенных растворах // Почвоведение. 1969. № 9. С. 68–78.
3. Фокин А.Д., Аргунова В.А., Кауричев И.С., Яшин И.М. Состав органического вещества, состояние полуторных окислов и фосфатов в водах, дренирующих подзолистые почвы // Изв. ТСХА. 1973. Вып. 2. С. 99–105.
4. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.П. Условия образования и масштабы миграции органо-минеральных соединений в почвах таежно-лесной зоны // Изв. ТСХА. 1969. Вып. 3. С. 103–110.
5. Вильямс В.Р. Почвоведение. М.: Сельхозгиз, 1946. 459 с.
6. Тюрин И.В. К методике анализа для сравнительного изучения состава почвенного перегноя или гумуса // Тр. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева АН СССР. 1951. Т. 38. С. 5–21.
7. Пономарева В.В. О реакциях взаимодействия группы креновой и апокреновой кислот (фульвокислот) с гидроокисями оснований // Почвоведение. 1949. № 11. С. 638–651.
8. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Шевченко Е.Е., Салаев И.В., Белимов А.А. Изучение почвенных растворов, вымываемых из мелиорируемых дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2018. № 12. С. 69–76.
9. Яшин И.М. Взаимодействие гидроксида железа, препаратов гуминовых кислот и доломита с водорастворимыми органическими веществами подзолистых почв // Изв. ТСХА. 1991. Вып. 5. С. 46–61.
10. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Маслова А.И. Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почвах при известковании конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 6. С. 23–27.
11. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
12. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв. СПб., 2010. 254 с.
13. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // Агрохимия. 2018. № 3. С. 50–61.
14. Пономарева В.В., Рагим-Заде А.И. Сравнительное изучение фульвокислот и гуминовых кислот как агентов разложения силикатных минералов // Почвоведение. 1969. № 3. С. 26–36.
15. Салаев И.В., Литвинович А.В., Шевченко Е.Е. Влияние крупных фракций отсева щебеночного производства на содержание гумуса в дерново-подзолистой суглинистой почве, урожаи и химический со-

- став растений гороха // *Агрофизика*. 2016. № 3. С. 7–14.
16. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О.* Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 31–41.
 17. *Litvinovich A.V., Salaev I.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Saljnikov E.* Utilization of large-sized dolomite by-product particles and losses of cations from acidic soil // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2019. T. 50. № 7. С. 1–9.
 18. *Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В.* О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // *Агрохимия*. 2001. № 2. С. 74–78.
 19. *Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю.* Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // *Агрохимия*. № 4. 2002. С. 81–87.
 20. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Последствия применения конверсионного мела для мелиорации кислых почв: стронций в системе дерново-подзолистая почва–растение // *Почвоведение*. 2013. № 9. С. 1138–1150.
 21. *Лаврищев А.В., Литвинович А.В.* Стабильный стронций в агроэкосистемах. СПб.: Лань, 2019. 192 с.
 22. *Плотникова Т.А., Пономарева В.В.* Упрощенный вариант метода определения оптической плотно-
 - сти гумусовых веществ с одним светофильтром // *Почвоведение*. 1967. № 7. С. 73–85.
 23. *Литвинович А.В., Небольсина З.П.* Продолжительность действия мелиорантов в почвах и эффективность известкования // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 79–94.
 24. *Бакина Л.Г.* Роль фракций гумусовых веществ в почвенно-экологических процессах: Дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2012. 381 с.
 25. *Пестряков В.К.* Окультуривание почв Северо-Запада. Л.: Колос, 1977. 273 с.
 26. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В.* Динамика содержания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // *Агрохимия*. 2018. № 8. С. 52–63.
 27. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю.* Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2015. № 5. С. 61–68.
 28. *Зонн С.В.* Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 207 с.
 29. *Водяницкий Ю.Н.* Химия и минералогия почвенного железа. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2003. 238 с.
 30. *Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О.* Изучение динамики изменения содержания подвижного железа в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой доломитом // *Агрохимия*. 2019. № 3. С. 44–53.

Migration Mobility of Al, Mn and Fe in Reclaimed Sod-Podzolic Soils

A. V. Litvinovich^{a, #}, O. Yu. Pavlova^a, A. V. Lavrishchev^b, and A. A. Belimov^c

^a*Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp., 14, St. Petersburg 195220, Russia*

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg—Pushkin 196601, Russia*

^c*The Russian Research Institute of Agricultural Microbiology
shosse Podbelsky 3, St. Petersburg—Pushkin 196608, Russia*

[#]*E-mail: a.v.lavrishchev@yandex.ru*

The composition of organo-mineral complexes (OMC) migrating from the arable horizon was studied in laboratory experiments on columns conducted on sod-podzolic soils reclaimed by different-sized dolomite particles at a scientifically justified dose (1.0 H_a) and conversion chalk (CC) at a deliberately inflated dose (2.5 H_a). Regardless of the amount and composition of the lime material used in the experiments, the carbon content in the OMC varied from 5.5 to 5.7%. The optical density index ($E^{cmg/ml}$) varied in the range of values typical for fulvic acids (FC) from 2.7 to 3.1. The FC averaged by the bases retained the ability to have a destructive effect on soil minerals, transferring a significant amount of Al, Mn, and Fe to the solution. Podzol formation in reclaimed soils did not stop. According to the ability to migrate in the composition of OMC deposited with alkali, the studied elements in the experiment with dolomite particles were arranged in the following descending order: Mn > Al > Fe, in the experiment with CC, used in a deliberately inflated dose: Al > Mn > Fe. The amount of migrating manganese in the experiment with dolomite particles was 15.8–32.1 times more than aluminum and 7.7–8.0 times more than iron. In the experiment with CC, the amount of migrating aluminum exceeded the content of migrating iron and manganese by 2.8 and 1.9 times, respectively.

Key words: soil liming, migration of aluminum, manganese and iron, organo-mineral complexes, acid hydrolysis of minerals, podzol formation.