

Тютюнник С.Ю., Ребенков С.О., Бобков В.М., Долін В.В.
Інститут геохімії навколишнього середовища

ОРГАНІЧНІ ФОРМИ ЗНАХОДЖЕННЯ АЛЮМІНІЮ У ҐРУНТАХ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

Наведено результати досліджень розподілу органічних форм алюмінію у ґрунтах грабового та дубового лісу. Показано, що інтенсивність процесів гуміфікації та опідзолювання в лісових ґрунтах обумовлює відмінності розподілу фульватів і гуматів алюмінію по вертикальному профілю.

Вступ

У число ґрунтових сполук алюмінію входять оксиди та гідроксиди, мінерали, солі, які містять Al, прості та комплексні сполуки алюмінію з природними органічними речовинами та алюмосилікати.

Алюміній у ґрунтах представлений сполуками з різною розчинністю. Для ґрунтів гумідних зон (підзолисті, дерново-підзолисті, болотні, червоноземні) характерна присутність іонообмінних форм алюмінію, зазвичай, у кількості від десятих часток до 3 – 10 мг-екв на 100 г ґрунту.

Переважає частина алюмінію у більшості ґрунтів представлена силікатами, які є найбільш стійкими сполуками. У крупнодисперсних гранулометричних фракціях ґрунту алюміній представлений різними орто- та полісилікатами, передусім, мусковітом, епідотом, мікрокліном, ортоклазом. Основна частина алюмінію у ґрунтах міститься у складі тонкодисперсних фракцій, переважно шарових силікатів — глинистих мінералів. Це, в основному, мінерали групи гідролюд — $K_x(Al, Mg, Fe)_{2-3}[Si_{4-x}Al_xO_{10}] \cdot (OH)_2 \cdot nH_2O$, каолініту — $Al_4(OH)_8 \cdot [Si_4O_{10}]$ та монтморилоніту — $Al_2(OH)_2 \cdot [Si_4O_{10}]$ [3]. Також до силікатів, що зустрічаються у ґрунтах, відносяться безводні силікати алюмінію — силіманіт та дистен. Їхній склад виражають загальною формулою Al_2SiO_5 . Ці мінерали більш характерні для метаморфічних порід.

Різноманітність форм сполук алюмінію у ґрунтах визначає складність визначення всіх тих індивідуальних речовин, які присутні в конкретному ґрунті та містять алюміній. Значно зручніше та ефективніше проводити визначення окремих груп сполук, розуміючи під групою сукупність речовин, які входять до складу ґрунту та мають одну або декілька схожих властивостей. У ґрунтознавстві застосовують визначення групового складу гумусу, групового складу фосфатів, сполук заліза та ін.

Аналіз групового складу дозволяє виявити зональні та генетичні властивості ґрунтів і їх горизонтів більш чітко, ніж вивчення індивідуальних речовин. Це пояснюється тим, що схожі за властивостями речовини беруть участь в одних і тих же хімічних процесах, а їх склад та кількість відображають специфіку ґрунтоутворення.

Найважливішу роль у ґрунтово-хімічних процесах, а також при формуванні родючості ґрунтів відіграють сполуки алюмінію, які знаходяться в ґрунтового розчині. Концентрація та форми таких сполук значною мірою визначаються показником кислотності ґрунтової вологи [4,5].

Особливості поведінки алюмінію у ґрунті

Міграційна здатність елементів I групи практично не залежить від значень рН ґрунту. Лужноземельні хімічні елементи більш чутливі до рН (а також Eh) ґрунту. Їхні гідроксиди за певних умов можуть переходити у тверду фазу. Вплив рН та Eh ґрунту на формування та міграцію алюмінію дуже сильний, а для елементів IV — VIII груп лужно-кислотні та окислювально-відновлювальні параметри ґрунту виступають головними чинниками хімічних перетворень.

Гідроксид алюмінію проявляє типові амфотерні властивості. У достатньо кислому середовищі він розчиняється з утворенням солі, яка містить катіон алюмінію Al^{3+} :



У лужному середовищі утворюються алюмінати. При реакції гідроксиду алюмінію з надлишком лугу утворюються гідроксоалюмінати:



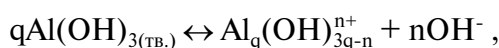
У звичайному для ґрунтів Українського Полісся інтервалі рН (4,5 – 7,0) у розчині присутні різні форми алюмінію: Al^{3+} (або $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$), AlOH^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Їх співвідношення залежить від величини рН.

Різні автори вказують на існування, в залежності від рН та іонної сили розчину, таких іонів, як $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_3^{3+}$, $\text{Al}_3(\text{OH})_6^{3+}$, $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$, $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}^{2+}$, $\text{Al}_3(\text{OH})_8^+$. Вплив цих іонів на кількісні закономірності ґрунтово-хімічних реакцій досі вивчено недостатньо [3-5].

При підвищенні рН зростає здатність алюмінію до полімеризації [8].

Формування полімерних частинок пов'язано з тим, що сполуки трьохвалентного алюмінію типу AlCl_3 електронодифіцитні; в таких молекулах на зовнішньому енергетичному рівні алюмінію знаходиться тільки 6 електронів. Тому такі сполуки легко утворюють димери і навіть полімери, в яких атом алюмінію відіграє роль акцептора електронної пари.

Реакція розчинності гідроксиду алюмінію в загальному вигляді може бути представлена рівнянням:



де q виражає ступінь полімеризації відповідних іонів, а n – їх заряд. Відповідну константу реакції K можна записати у вигляді

$$K = [\text{Al}_q(\text{OH})_{3q-n}^{n+}] [\text{OH}^-]^n / \text{Al}(\text{OH})_{3(\text{тв.})}$$

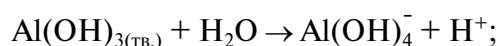
де квадратні дужки означають активності компонентів.

У дещо спрощеній формі зв'язок між концентрацією мономерних форм Al та величиною рН в даному випадку можна записати таким чином:

$$p\text{Al} - n\text{pH} = pK - n\text{p}K_{\text{в}} - p\gamma_{\text{Al}(\text{OH})_{3q-n}^{n+}} ,$$

де $K_{\text{в}}$ – іонний добуток води; γ – коефіцієнт активності іонів алюмінію.

Для реакцій утворення гідроксоалюмінатів



та ж залежність записується у вигляді:

$$p\text{Al} - \text{pH} = pK' - p\gamma_{\text{Al}(\text{OH})_4^-} ,$$

де K' – константа реакції утворення гідроксоалюмінатів.

Концентрація алюмінію у ґрунтовому розчині обумовлена розчинністю його сполук, які знаходяться у твердій фазі. Найбільшу розчинність має свіжоосаджений гідроксид алюмінію – $\text{Al}(\text{OH})_3$.

При розчиненні будь яких алюмінійвмісних мінералів (гіббситу, беміту тощо) іони алюмінію, які переходять в розчин, утворюють осад $\text{Al}(\text{OH})_3$. У цьому разі концентрація алюмінію в розчині буде відповідати розчинності свіжоосадженого $\text{Al}(\text{OH})_3$. Оскільки у водному середовищі завжди містяться гідроксильні іони, а значення рН у ґрунтових розчинах нижче 4 зустрічається рідко, то для алюмінію компонентом, що регулює концентрацію, є $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Здатність алюмінію до хімічних перетворень залежить від складу та заряду сполук. Іон алюмінію Al^{3+} бере участь у реакціях обміну катіонів. При взаємодії частинки $\text{Al}(\text{OH})_3$ з ґрунтовим поглинаючим комплексом (ГПК) відбувається адсорбція гідроксиду на частинках ґрунту. Одно- та двопозитивно заряджені іони мають проміжні властивості, а для негативно зарядженого іону $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ найбільш характерною може бути реакція по типу обміну аніонів або лігандний обмін.

Концентрація іонів Al^{3+} при розчиненні $\text{Al}(\text{OH})_3$ залежно від рН визначається з величини добутку розчинності гідроксиду алюмінію – $[\text{Al}^{3+}][\text{OH}^-]^3 = 5 \cdot 10^{-33}$. З підвищенням рН концентрація Al^{3+} швидко зменшується і при значенні рН = 4,5 досягає значень менше $10^{-2} \text{ г} \times \text{дм}^{-3}$ ($10^{-4} \text{ М} \times \text{дм}^{-3}$) [3]. (рис. 1).

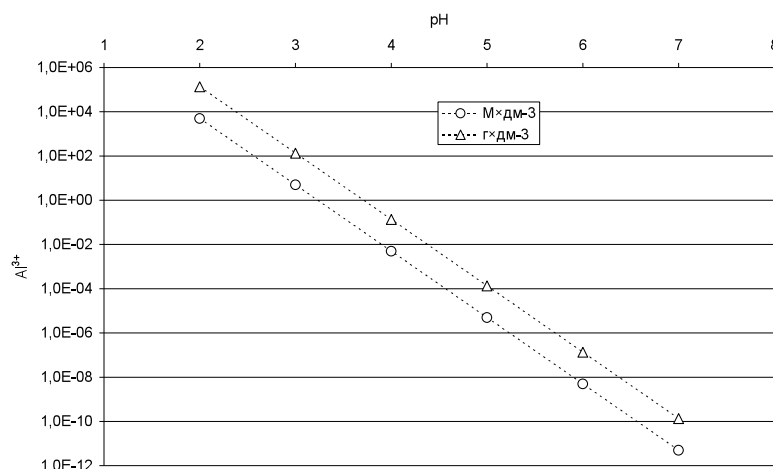


Рис. 1. Концентрація катіонів Al^{3+} при розчиненні $\text{Al}(\text{OH})_3$ залежно від рН.

Значення рН нижче 4 – 4,5, за яких концентрація алюмінію достатньо висока, зустрічається у ґрунтах не часто. У сильно опідзолених, деяких болотних ґрунтах рН водної витяжки може бути нижче 4,5 – 5, як це спостерігалось в торф'яних ґрунтах Білоозерського лісництва Рівненського природного заповідника [6], але у верхніх горизонтах дерново-підзолистих та сірих лісових ґрунтах реакція менш кисла, а у степових ґрунтах водні витяжки характеризуються величинами рН=6 – 8.

Для прикладу міграції алюмінію у вигляді простого іону Al^{3+} по ґрунтовому профілю зробимо простий розрахунок. Прийнемо кількість опадів рівною $500 \text{ мм} \times \text{рік}^{-1}$ та припустимо, що вся волога просочується до дзеркала ґрунтових вод. В перерахунку на 1 м^2 поверхні ця кількість опадів відповідає 500 л. У такому об'ємі води при рН = 5 може міститися 70 мг Al^{3+} , відповідно, така кількість алюмінію і може бути витіснена з ґрунтової товщі чи перенесена з одного горизонту в інший. Якщо вважати, що Al переноситься із шару 0 – 20 см в горизонти, які знаходяться нижче, то при масі ґрунтового шару 0 – 20 см – 300 кг – загальне винесення алюмінію за рік не перевищить $2 \cdot 10^{-5} \%$ від маси ґрунту (або близько $3 \cdot 10^{-4} \%$ від запасів Al). Потрібно не менше 50 – 60 тисяч років, щоб при такому промиванні створити між двома горизонтами різницю в абсолютному вмісті алюмінію величиною в 1,5 – 2 % (що характерно для підзолистих ґрунтів). А оскільки у промиванні ґрунтів бере участь реально далеко не весь об'єм атмосферних опадів, і величини рН, особливо на початкових стадіях підзолоутворення, ближчі до 6, ніж до 5, то очікуваний термін складе вже сотні тисяч років. Отже при рН = 4,5 – 7 міграція алюмінію у формі Al^{3+} практично не впливає на його розподіл по профілю.

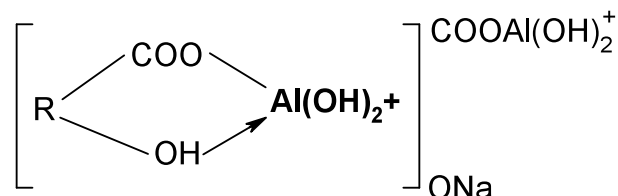
Можна припустити, що в області значень рН = 4,5 – 5,5 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ще може мігрувати у помітних кількостях. В інтервалі значень рН = 6 – 9 міграція алюмінію у формах простих іонів та гідрокомплексів практично неможлива. І лише в області значень рН > 10 можуть мігрувати по ґрунтовому профілю в реальних обсягах іони $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ та $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$.

Диференціація вмісту Al у ґрунтовому профілі, яка спостерігається при слабо кислій та майже нейтральній реакції ґрунтового розчину, веде до припущення, що його переміщення відбувається у вигляді більш розчинних комплексних сполук з органічними лігандами [2].

Відомо, що Al^{3+} утворює комплекси з оксалат-іоном $(\text{COO})_2^{2-}$, саліцилат-іоном $[\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})\text{O}]^{2-}$, сульфосаліцилатом $[\text{C}_6\text{H}_3\text{O}(\text{COO})(\text{SO}_3)]^{3-}$, етилендіамінтетраацетатом $[(\text{OOCCH}_2)_2\text{N}(\text{CH}_2)_2\text{N}(\text{CH}_2\text{COO})_2]^{4-}$, купференом, оксигіноліном та сполуками інших класів. Аналогічні реакції можливі й у середовищі ґрунту [3].

Здатність органічних кислот утворювати стійкі розчинні комплекси з Al є дуже важливим фактором міграції алюмінію в ґрунтовому профілі та ландшафті [7].

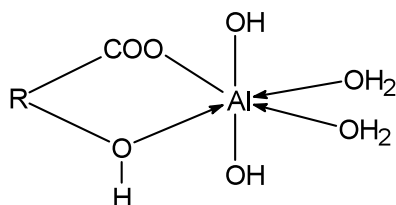
Алюміній утворює комплексні солі з гумусовими кислотами, входячи при цьому в аніонну частину молекули. Частина алюмінію, який входить в склад алюмогумінових сполук, не здатна до обмінних реакцій, а частина витісняється катіоном нейтральної солі. Це свідчить про двоякість природи алюмінію в алюмогумінових сполуках. Одна його частка входить до внутрішньої сфери молекули та не здатна до реакції обміну катіонів, інша – заміщує водень функціональних груп, і цей Al вступає в реакцію обміну з катіонами:



Природні органічні речовини (гумусові речовини, які представлені фульвовими та гуміновими кислотами (що розрізняються за розчинністю у кислотах і лугах) відіграють важливу роль у процесах ґрунтового живлення рослинності.

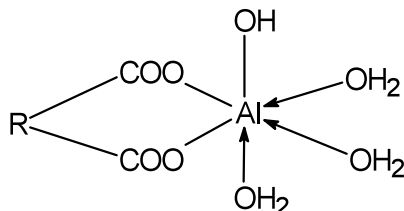
Експериментальні дані [3] показують, що при взаємодії Al з гумусовими кислотами, як і Fe, можливі реакції трьох типів:

1) участь в реакції однієї карбоксильної групи COOH та однієї фенольної групи OH:

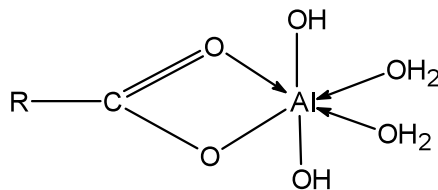


де R – радикал гумінової кислоти;

2) участь в реакції двох гідроксильних груп:



3) участь тільки однієї карбоксильної групи, здатної займати два координаційних місця:



Атоми алюмінію, які входять у внутрішню сферу таких молекул, практично ізольовані від звичайних ґрунтово-хімічних реакцій, а рівень їх вмісту у ґрунтового розчині (і, відповідно, міграційна здатність) залежить тільки від розчинності утворених комплексів, рухомість яких, може і не бути пов'язана з кислотно-основними властивостями середовища [1].

Об'єкти і методи дослідження

Для аналізу було взято профілі сірого лісового ґрунту під грабовим лісом на південно-східній околиці м. Києва та опідзолені чорноземи під дібровою у Пилиповецькому

лісництві (Новоград-Волинський район Житомирської обл.) Пробна площа екосистеми грабового лісу розміром 40 × 50 м (0,2 га), розташована на північному схилі горба крутизною 30°. Відбори ґрунту проведено з площі 500 см², ґрунт відбирався пошарово через кожні 2 см до глибини 30 см. Пробна площа діброви — 1 га, відбирання проб ґрунту проведено з ділянки 500 см², шари ґрунту відбиралися пошарово через кожні 5 см до глибини 1 м.

До наважки ґрунту (10 — 30 г залежно від типу ґрунту) додавали 50 см³ 0,1 М розбавленого розчину гідроксиду натрію, суміш ретельно перемішували скляною паличкою і залишали при кімнатній температурі на 24 години. Розчин відділяли від осаду фільтруванням через паперовий фільтр «синя стрічка». Оброблення повторювали до знебарвлення екстракту.

До фільтрату по краплям додавали концентровану азотну кислоту, перемішуючи скляною паличкою, доки рН розчину не досягне 3 (за лакмусовим папером) і залишали при кімнатній температурі на 24 години. Осад гумінових кислот фільтрували через паперовий фільтр (синя стрічка), промивали дистильованою водою і висушували до повітряно сухого стану.

Наважку висушеного осаду гумінової кислоти озолювали у скляному термостійкому стакані об'ємом 50 см³ при температурі 400 °С протягом 3 годин. Після охолодження до кімнатної температури, до залишку додавали 15 см³ 0,1 М розчину азотної кислоти, перемішували і нагрівали до кипіння. В охолоджений до 50 — 60 °С розчин по краплям додавали 5 см³ 30 % розчину перекису водню (для розчинення двоокису марганцю), суміш ретельно перемішували скляною паличкою і залишали при кімнатній температурі на 24 години.

Отриманий таким чином розчин фільтрували через паперовий фільтр (синя стрічка), осад на фільтрі двічі промивали дистильованою водою. Вміст алюмінію в розчині визначали фотоколориметричним методом за ГОСТ 26485 — 85.

Розчин фульвокислот випарювали досуха у сушильній шафі при температурі 80 — 90 °С. Сухий залишок озолювали при температурі 450 °С протягом 4 годин. Після охолодження до кімнатної температури до залишку додавали 15 см³ 0,1 М розчину азотної кислоти та 3 см³ 30 % розчину перекису водню для розчинення двоокису марганцю. Суміш кип'ятили 15 хв і залишили на 24 години.

Отриманий таким чином розчин фільтрували через паперовий фільтр (синя стрічка); осад на фільтрі двічі промивали дистильованою водою. Вміст алюмінію в розчині визначали фотоколориметричним методом за ГОСТ 26485 — 85.

Результати та їх обговорення

Досліджені ґрунти Полісся і Лісостепу збіднені на гумусові речовини — їх вміст у верхніх шарах ґрунту становить близько 2 г×кг⁻¹ і різко знижується з глибиною. Частка алюмінію, пов'язаного в гумінові комплекси становить 2—4 % та 11 — 18 % — міститься у фракції, до якої входять фульвокислоти (таблиця). Слід зазначити, що до останньої фракції також включені неорганічні форми Al, що виділяються з ґрунту при обробленні розбавленим розчином луґу з утворенням тетрагідроксоалюмінату натрію:



При підкисленні лужного розчину комплексні сполуки алюмінію з гуміновими кислотами випадають в осад, у розчині лишаються комплексні сполуки з фульвовими кислотами (водорозчинні) та нітрат алюмінію.

Концентрація Al у складі гуматів у ґрунтах екосистеми грабового лісу становить 0,2—4,6 мг×кг⁻¹ при середньому значенні близько 2 мг×кг⁻¹ (таблиця). У складі фульватів та неорганічних сполук, що вилуговуються 0,1 М NaOH, міститься 17 — 49 мг×кг⁻¹ Al при середньому значенні близько 32 мг×кг⁻¹.

У складі гуматів ґрунтів під дібровою Житомирського Полісся міститься 0,002 — 134 мг×кг⁻¹ ґрунту Al, середній вміст становить близько 17 мг×кг⁻¹. Концентрація гуматів Al у розрахунку на масу гумінової кислоти становить у верхньому 25-см шарі ґрунту 1,8 — 14,8 г×кг⁻¹, у нижніх шарах — значно зменшується — до 0,053 мг×кг⁻¹. На глибині нижче 75 см гумінові кислоти практично відсутні.

Таблиця Вміст Al у пошарово виділених фракціях гумінових і фульвокислот

Шар, см	Загальний вміст алюмінію в ґрунтовому профілі	Частка Al у фульвокислотах	Частка Al у гумінових комплексах
	мг×кг ⁻¹	%	%
Світло-сірий лісовий ґрунт під грабовим лісом			
0-2	382	4,58	0,288
2-4	121	17,56	0,771
4-6	130	16,31	2,275
6-8	354	6,83	1,011
8-10	471	8,39	0,982
10-12	538	6,10	0,316
12-14	480	7,57	0,364
14-16	546	8,99	0,427
16-18	628	6,08	0,059
18-20	682	6,03	0,272
20-22	551	6,86	0,049
22-24	584	3,89	0,031
24-26	397	6,49	0,461
26-28	373	10,03	0,080
28-30	443	8,36	0,156
Опідзолений чорнозем під дубовим лісом			
0-5	2918	4,77	2,411
5-10	3231	5,57	4,136
10-15	3906	6,19	0,737
15-20	3075	8,47	0,301
20-25	2864	6,55	0,310
25-30	2017	8,63	0,007
30-35	4057	4,18	0,004
35-40	5893	2,65	0,002
40-45	7153	2,15	0,002
45-50	4862	2,61	0,001
50-55	6235	2,92	0,001
55-60	4104	4,20	0,002
60-65	5103	3,42	0,002
65-70	3751	4,70	0,002
70-75	3421	4,67	0,001
75-80	3628	4,39	Не визн.
80-85	8972	1,66	Не визн.
85-90	3367	4,38	Не визн.
90-95	2232	5,75	Не визн.
95-100	1163	11,31	Не визн.

Примітка: Не визн. — не визначалося у зв'язку з низьким вмістом органічних речовин у нижніх шарах ґрунту

У складі фульвокомплексів та неорганічних сполук, що вилуговуються розбавленим лугом із ґрунту, міститься 127 — 260 мг·кг⁻¹ Al. Це в середньому, близько 170 мг·кг⁻¹, що майже в 6 разів більше, ніж у відповідній фракції ґрунтів екосистеми грабового лісу.

Поведінка гуматів і фульватів, що містять алюміній, у сірих лісових ґрунтах і чорноземах опідзолених суттєво різна. Гумати і фульвати є індикаторами різних процесів ґрунтоутворення і функціонування ґрунту. Гумати тісно пов'язані із дерновим процесом і процесом гумусонакопичення, а фульвати — з підзолистим процесом (з процесом гумусоутворення фульвати теж пов'язані, але в умовах грабових і дубових лісів значно меншою мірою, аніж гумати). Оскільки інтенсивність прояву процесу гумусонакопичення і підзолистого процесу у сірих лісових ґрунтах і чорноземах опідзолених є різною (це ґрунти різних типів), то й міграція алюмінію, асоційованого з гуматами і фульватами, по профілю ґрунту, має відрізнитися.

У сірих лісових ґрунтах спочатку найбільш інтенсивно проявляється підзолистий процес (максимальний вміст фульвокомплексів Al (Ф-Ал) спостерігається на глибині близько 4 см), у нижчих шарах — інтенсифікується процес гумусонакопичення (максимальний вміст гумінових комплексів Al (Г-Ал) на глибині 5,5 см), нижче по профілю ґрунту вміст усіх органічних форм алюмінію швидко зменшується з глибиною. На глибині нижче 9 см концентрації Ф-Ал та Г-Ал змінюються синхронно (рис. 2).

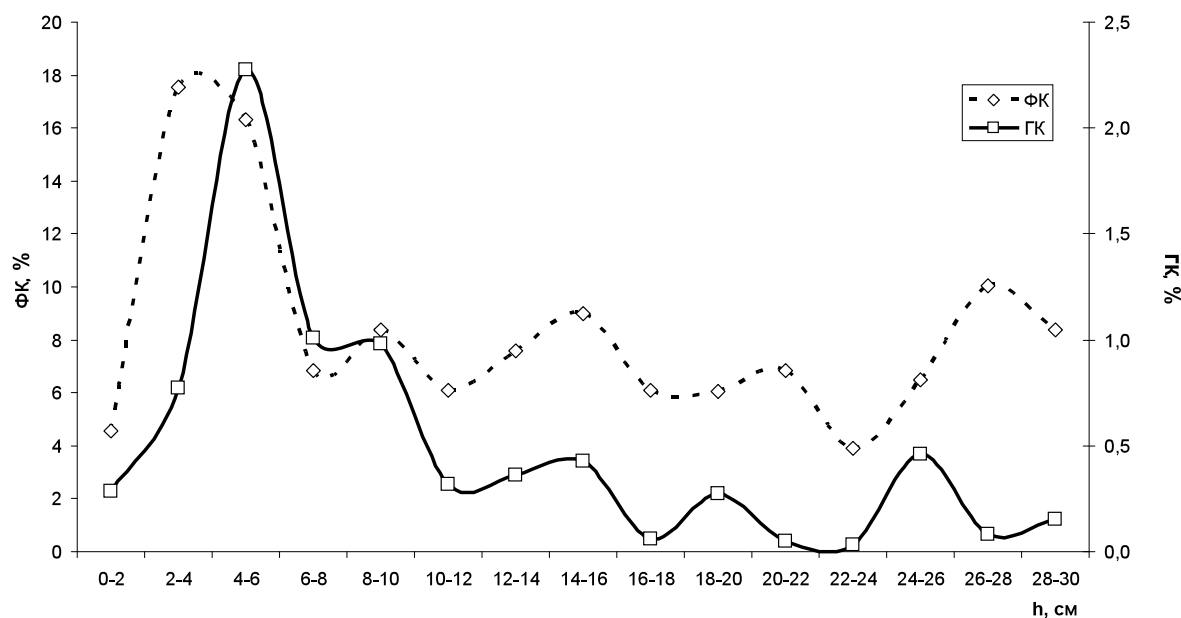


Рис. 2. Розподіл фульватних (ФК) і гуматних (ГК) форм алюмінію по профілю світло-сірого лісового ґрунту грабового лісу (околиці Києва)

В опідзолених чорноземах підзолистий процес сповна дається взнаки лише на глибинах 15 — 20 см (максимум вмісту Ф-Ал), вище переважає процес гумусонакопичення, який максимально розвинутий на глибині 6 — 8 см (максимум вмісту Г-Ал) (рис. 3). Такий розподіл фульватних і гуматних форм Al по профілю є цілком природним, оскільки відбиває співвідношення процесів опідзолювання і гумусонакопичення у ґрунтах цих двох типів. Нижче по профілю процеси гумусонакопичення і в сірих лісових, і в чорноземних опідзолених ґрунтах затухають, що видно з мінімуму вмісту гуматних форм на глибинах 24 — 30 см. Водночас процес міграції вниз по профілю фульватних форм алюмінію не затухає зовсім, фульвати значно рухоміші, хімічно агресивніші і тому ідентифікуються в нижче лежачих горизонтах. В опідзоленому чорноземі на глибинах 90 — 100 см спостерігається різке збільшення фульватних форм алюмінію (рис. 3). Вірогідно, це пов'язано із розвитком на цих глибинах ілювіального процесу із відповідною затримкою на сорбційному бар'єрі фульватного алюмінію, що мігрував з горішніх ґрунтових шарів. З іншого боку, можливо накопичення в цих шарах гідроокису алюмінію, який розчиняється при вилуговуванні NaOH.

У світло-сірих лісових ґрунтах спостерігається когерентність процесів опідзолювання та гуміфікації (коефіцієнт кореляції $K_{\text{кор.}} = 0,65$), в опідзолених чорноземах до глибини 30 см кореляція не спостерігається взагалі ($K_{\text{кор.}} = 0,02$).

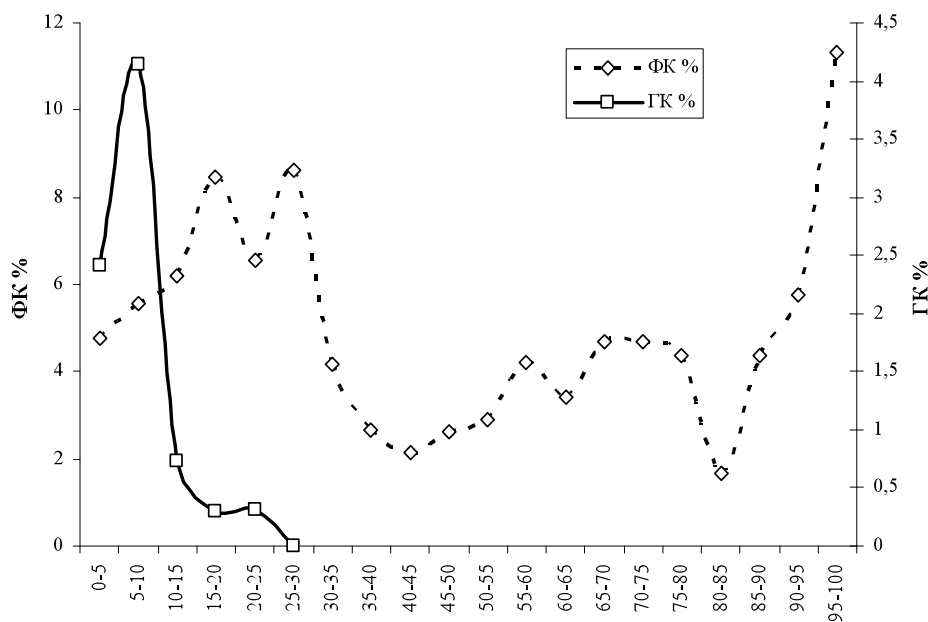


Рис. 3. Розподіл фульватних (ФК) і гуматних (ГК) форм алюмінію по профілю чорноземного ґрунту опідзоленого дубового лісу (Новоград-Волинський р-н Житомирської обл.)

Цей факт можна пояснити тим, що конкуренція між процесами гумусонакопичення і опідзолювання в опідзоленому чорноземі значно вища, аніж у сірому лісовому ґрунті. Для чорнозему опідзолення не є характерним, зустрічається лише у специфічних умовах відносного перезволоження. Для сірого лісового ґрунту — навпаки, опідзолювання є природним процесом, який збалансовано з гумусонакопиченням.

Висновки

1. Переважна кількість алюмінію міститься у складі ґрунтових мінералів. Найбільше значення в геохімічних процесах відіграють сполуки алюмінію, що містяться в ґрунтовому розчині. Це передусім йони Al^{3+} , AlOH^{2+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Їх співвідношення залежить від величини рН.

2. Одним з найважливіших факторів міграції алюмінію у ґрунтовому профілі та ландшафті в цілому є здатність утворювати стійкі розчинні комплекси з природними органічними кислотами. Утворення гумінових та фульвокомплексів алюмінію в ґрунті значною мірою визначається розподілом природних органічних речовин у ґрунтовому профілі.

3. Питомий вміст алюмінію у складі гуматів сягає 15 г на кг гумінової кислоти та підлягає значним флуктуаціям при зміні фізико-хімічних умов середовища у зоні впливу природних геохімічних бар'єрів.

4. Характер розподілу фульватів та гуматів алюмінію по профілю світло-сірих лісових ґрунтів (грабовий ліс) і опідзолених чорноземів (діврова) суттєво відрізняються. В ґрунтах грабового лісу фульватний алюміній з'являється в максимальних кількостях в більш високих шарах, аніж гуматний, у ґрунтах діврови — навпаки. Це пов'язано з інтенсивністю процесів гуміфікації і опідзолювання в ґрунтах цих двох типів.

1. Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. — Л., 1980 г.
2. Эглинтон Дж., Мерфи М. Т. Дж. Органическая геохимия — Л.: Изд-во Недр, Ленинградское отд., 1974. С. 389 — 410.
3. Орлов Д. С. Химия почв. — М.: Изд-во МГУ, 1992. — С. 121— 149.
4. Пухальская Н.В. Проблемные вопросы алюминиевой токсичности//Агрохимия. — 2005. — №8. — С. 70 — 81.

5. Тянтова Е.Н., Бурухин С.Б., Сынзыныс Б.И., Козьмин Г.В. Химия алюминия в окружающей среде // Агрохимия. — 2005. — №2. — С. 87 — 91.
6. Тютюнник С.Ю., Ребенков С.О., Орлов О.О., Долін В.В. Форми знаходження алюмінію на фонових ділянках лісоболотних екосистем // Збірник наук. праць Ін-ту геохімії навколишнього середовища НАН та МНС України. — К., 2007. — Вип. 15. — С. 115 — 126.
7. Толпешта И. И. Соколова Т.А. Соединения алюминия в почвенных растворах и его миграция в подзолистых почвах на двучленных отложениях // Химия почв. 2009. № 1. — С. 29 — 41.
8. Толпешта И. И. Соколова Т.А. Соединения алюминия в вытяжках хлорида кальция из подзолистой почвы и их возможные источники. // Почвоведение. 2008. № 6. с. 679 — 692.

Тютюнник С.Ю., Ребенков С.А., Бобков В.Н., Долін В.В. ОРГАНИЧЕСКИЕ ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЯ В ГРУНТАХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Приведены результаты исследований распределения органических форм алюминия в почвах грабового и дубового леса. Показано, что интенсивность процессов гумификации и оподзоливания в лесных почвах обуславливает различия в распределении фульватов и гуматов алюминия по вертикальному профилю.

Tyutyunnik S.Yu., Rebenkov S.O., Bobkov V.N., Dolin V.V. ORGANIC FORMS OF ALUMINIUM IN SOILS OF FOREST ECOSYSTEMS

The article presents results of investigations of aluminum organic forms distribution in the hornbeam and oak forest soils. It is shown that the intensity of the humification and podzolization processes in forest soils causes differences in the distribution of fulvates and humates of aluminum in the vertical profile.