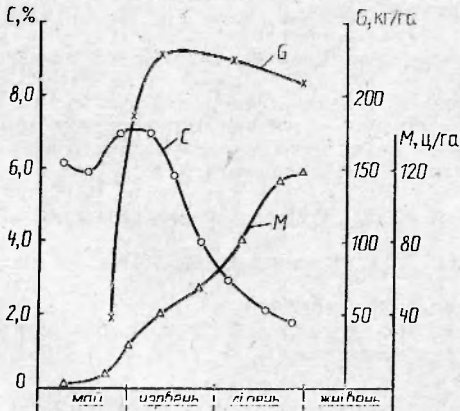


## МЕХАНІЗМ УПЛЫВУ ВОДНАГА РЭЖЫМУ ГЛЕБЫ НА ІНТЭНСІЎНАСЦЬ ПАСТУПЛЕННЯ РАДЫЕНУКЛІДАУ У РАСЛІНЫ

Яшчэ ў працах [1, 2] было паказана, што за кошт змянення размеркавання вільгаці па глыбіні глебы можна змяняць інтэнсіўнасць паглынання як несарбуемых (сера-35), так і магутна-сарбуемых глебай (фосфар-32) хімічных элементаў у некалькі разоў. Пры гэтым было вызначана, што максімум паглынання дадзеных радыенуклідаў па вертыкальным профілі каранямі супадае з максімумам паглынання імі глебай вільгаці. Доследы таксама паказалі, што з тых слаёў глебы, адкуль спыняецца забор каранямі вільгаці, спыняецца таксама паглынання пажыўных рэчываў. Велічыня ж паглынання каранёвай сістэмай з розных гарызонтаў глебы вільгаці пры пэўных умовах у большай ступені вызначаецца вільготнасцю глебы, чым масай каранёў, размешчаных у гэтых гарызонтах.

Так, непасрэднымі даследамі, а таксама выкананымі на аснове адваротных рашэнняў ураўненняў вільгацепераносу разлікамі было паказана, што пры моцным высушванні верхняга слоя глебы 5% масы ўсіх каранёў, размешчаных у ніжнім вільготным слоі глебы, паглынаюць 50% усёй транспіруемай (ва ўмовах нармальнага водазабеспячэння) вільгаці [3]. Меркавалася, што апісаная заканамернасць будзе справядлівай таксама для цэзію-137 і стронцыю-90. Аднак аказалася, што пры адпаведным насычэнні расліны іонамі калію (мал. 1) спыняецца яго паглынання каранёвай сістэмай пры працягванні паглынання вільгаці. Адпаведным чынам паводзіць сябе цэзій-137 пры высокай колькасці калію ў глебе. Так, у даследзе па вывучэнні ўплыву частаты скошвання траў на колькасць радыенуклідаў у прадукцыі адзначаны наступны фактар. Пры раннім укосе (25.05.94) ураджай склаў 29,6 ц/га сухога рэчыва, а колькасць цэзію-137 —  $41,0 \times 10^{-9}$  Ки/кг. Пры познім укосе (08.06.94) ураджай склаў 52,0 ц/га, а колькасць цэзію-137 —  $23,4 \times 10^{-9}$  Ки/кг. Агульная ж колькасць цэзію ў прадукцыі аказалася ў абодвух укосах практычна аднолькавай ( $1,25 \times 10^{-4}$  Ки і  $1,24 \times 10^{-4}$  Ки).

Натуральна меркаваць, што ў працэсе паглынання каранямі элементаў мінеральнага жыўлення важнейшую ролю адыгрывае не толькі інтэнсіўнасць удзельнага (на адзінку масы каранёў) паглынання імі вільгаці, але і іншыя нейкія фактары. Высветленне заканамернасцяў паглынання раслінай гэтых дзвюх важнейшых для яго росту і развіцця субстанцый уяўляе цікавасць як з навуковага, так і з практычнага пункту



Мал. 1. Змяненне ў часе надземнай біямасы ячменю (M), агульнай колькасці калію (G) і канцэнтрацыі калію (C)

погляду. На нашу думку, на сучасным узроўні ведаў прасцей за ўсё гэта можна зрабіць пры выкарыстанні метадаў тэорыі тэрмадынамікі нераўнаважных станаў [4, 5]. Згодна з гэтай тэорыяй, перанос  $j$ -й фазы  $i$ -га рэчыва адбываецца пад дзеяннем градыента хімічнага патэнцыялу, які вызначаецца прыростам поўнай энергіі сістэмы пры дабаўленні да яе адной малекулы (іона) гэтага рэчыва пры захаванні пастаяннымі энтрапіі, аб'ёму і саставу сістэмы. Зыходзячы з тэрмадынамічных уяўленняў, перанос вільгаці і элементаў мінеральнага жыўлення ў расліну, іх транспарт па каранях у надземныя органы і назад у карані можна апісаць наступнай спрошчанай мадэллю.

У працэсе транспірацыі вільгаці ў парэнхіме лістоў фарміруецца самае нізкае значэнне хімічнага патэнцыялу вільгаці, велічыня якога абумоўліваецца гідрастатычным ціскам (тургорам), асматычнымі сіламі і сіламі ўзаемадзеяння (у асноўным за кошт вадароднай сувязі) вады з арганічнымі структурамі клеткі [6]. Клеткі парэнхімы ліста за кошт адсмоктвання вільгаці з канчаткаў сасудаў ксілемы паніжаюць у ёй гідрастатычны ціск, які перадаецца па чаранках і сцяблу ў ксілему каранёў і паніжае тым самым яе хімічны патэнцыял вільгаці. У тым выпадку, калі хімічны патэнцыял вільгаці ў ксілеме караня робіцца ніжэйшым за хімічны патэнцыял глебавай вільгаці, узнікае паток вільгаці з глебы ў карань і далей у лісты. Пры гэтым у нармальных умовах воднага рэжыму расліны ў клеткавым соку парэнхімы лістоў тургорны ціск перавышае не толькі атмасферны, але і гідрастатычны ціск у сітападобных сасудах флаэмы, што выклікае (падобна механізму гутацыі) супрацьлеглы вадкі паток клеткавага соку з лістоў у карань.

Без сумнення, на ўсіх участках, пачынаючы ад атожылкаў ліста і заканчваючы каранём, паміж ксілемай і флаэмай адбываецца абмен вільгацю. Аднак велічыня гэтага абмену, відаць, на парадак ніжэй за транспірацыйны паток вільгаці па ксілеме. На сухіх участках глебы вільгаць з сітападобных валокнаў караня можа часткова паступаць у глебу, а ў вільготных — зноў мігрыраваць у ксілему. Такім чынам, ажыццяўляецца кругазварот раствору па расліне, асноўным энергетычным рухавіком якога з'яўляецца вонкавая энергія, затрачаная на транспірацыю і фотасінтэз, а жывячым рэзервуарам — глебавая вільгаць. У апісаным механізме вільгацеабмену ў сістэме глеба—расліна—атмасфера не закранаецца праблема транспарту вады ў жывых клетках за кошт энергетычнага абмену пры біяхімічных працэсах.

Тым не менш, з тэрмадынамічнага пункту погляду абгрунтавана можна сцвярджаць, што значэнне хімічнага патэнцыялу ў флаэме заўсёды будзе знаходзіцца паміж велічыняй яго ў ксілеме і глебе. Неабходна адзначыць, што матэматычная фармалізацыя ўсяго апісанага вышэй працэсу вільгацеабмену ў сістэме глеба—расліна—прыземны слой паветра не выклікае складанасцяў. Аднак практычнае выкарыстанне такой мадэлі на дадзены момант немагчыма без ведання параметраў пераносу вільгаці ў розных частках надземных і падземных органаў расліны.

Мадэляванне працэсу вільгацеабмену дазваляе разглядаць уплыў апошняга на працэс паглынання мінеральных рэчываў каранямі з глебы і іх кругазварот па расліне. Калі зыходзіць з меркавання [7] пра неістотнасць канвектыўнага пераносу хімічных элементаў папярочным патокам вільгаці на ўчастку флаэма—ксілема, то можна сцвярджаць, што асноўны паток элемента ў ксілему адбываецца пад дзеяннем розніцы хімічных патэнцыялаў гэтага рэчыва:

$$q_s = - \frac{\mu_\phi - \mu_\kappa}{R_{\phi\kappa}} \approx \varepsilon_{\phi\kappa} (C_\phi - C_\kappa), \quad (1)$$

дзе  $\mu_\phi$ ,  $\mu_\kappa$  — хімічныя патэнцыялы разглядаемага рэчыва ў растворах, што запаўняюць флаэму і ксілему,  $C_\phi$ ,  $C_\kappa$  — сумарныя канцэнтрацыі не звязанага з клеткавымі структурамі рэчыва і аналагічных яму па ўдзеле

ў працэсах біясінтэзу рэчываў у флаэме і ксілеме,  $R_{\text{фк}}$ ,  $\epsilon_{\text{фк}}$  — супраціўленне і каэфіцыент абмену разглядаемых рэчываў на ўчастку флаэма—ксілема.

Міграцыя хімічнага элемента з глебы ў ксілему ў канчатковым выніку абумоўліваецца паніжэннем яго хімічнага патэнцыялу за кошт зніжэння канцэнтрацыі гэтага элемента вадой, якая паступае ў ксілему.

Пераход у (1) ад розніцы хімічных патэнцыялаў рэчыва да сумарных канцэнтрацый рэчываў, што валодаюць падобнымі ўласцівасцямі ў працэсах біясінтэзу (напрыклад, калію і цэзію), з'яўляецца набліжаным. Аднак ён дазваляе значна спрасціць фармальнае апісанне самога працэсу абмену рэчываў у сістэме глеба—расліна.

Пры стацыянарным рэжыме пераносу вільгаці і разглядаемых элементаў на канцавым участку асобнага караня даўжынёй  $l$  гэты працэс можна апісаць наступнай сістэмай ураўненняў:

$$q_w C_k = \epsilon_{\text{фк}} (C_{\text{ф}} - C_k), \quad (2)$$

$$\epsilon_{\text{гф}} (C_{\text{г}} - C_{\text{ф}}) + i_w C_{\text{л}} = \epsilon_{\text{фк}} (C_{\text{ф}} - C_k), \quad (3)$$

дзе  $C_{\text{г}}$ ,  $C_{\text{ф}}$ ,  $C_k$ ,  $C_{\text{л}}$  — сярэднія па даўжыні канцэнтрацыі свабодных хімічных элементаў (іонаў) у растворах глебы, флаэмы, ксілемы і ліста;  $q_w$  — папярочны прыток вільгаці ў ксілему на адзінку даўжыні караня;  $i_w$  — падоўжны прыток вільгаці з надземнай часткі расліны ў флаэму на адзінку даўжыні караня;  $\epsilon_{\text{гф}}$ ,  $\epsilon_{\text{фк}}$  — каэфіцыенты абмену на ўчастку глеба—флаэма і флаэма—ксілема.

Сістэма ўраўненняў (2), (3) атрымана з прадпасылкі, што вертыкальны перанос хімічных элементаў (злучэнняў) па ксілеме і флаэме ажыццяўляецца канвектыўным шляхам, а папярочны — як за кошт канвектыўнага механізма, так і за кошт дыфузіі і працякаючых у карані біяхімічных рэакцый. У сувязі з гэтым трэба адзначыць, што і параметр  $\epsilon$  характарызуе праводнасць рэчываў, абумоўленую самымі рознымі механізмамі.

З сістэмы ўраўненняў (1), (3) вынікае, што паступленне рэчываў у ксілему на адзінку даўжыні караня вызначаецца суадносінамі

$$q_{\text{ск}} = \epsilon_{\text{фк}} (\epsilon_{\text{гф}} C_{\text{г}} + i_w C_{\text{л}}) \left( 1 - \frac{\epsilon_{\text{фк}}^2}{q_w + \epsilon_{\text{фк}}} \right) / \left( \epsilon_{\text{гф}} + \epsilon_{\text{фк}} - \frac{\epsilon_{\text{фк}}^2}{q_w + \epsilon_{\text{фк}}} \right), \quad (4)$$

а іх патак на ўчастку паверхня караня—флаэма — суадносінамі

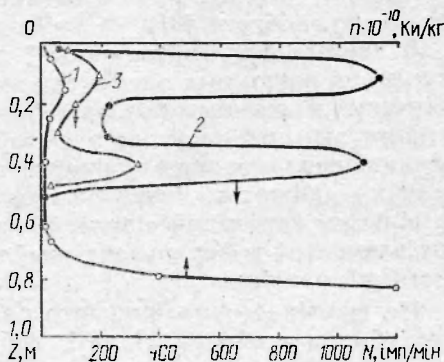
$$q_{\text{сф}} = \epsilon_{\text{гф}} \left( C_{\text{г}} - \frac{\epsilon_{\text{гф}} C_{\text{г}} + i_w C_{\text{л}}}{\epsilon_{\text{гф}} + \epsilon_{\text{фк}} - \frac{\epsilon_{\text{фк}}^2}{q_w + \epsilon_{\text{фк}}}} \right). \quad (5)$$

Аналіз суадносін (4) паказвае, што пры павелічэнні  $q_w$  павялічваецца і  $q_{\text{ск}}$ , але не прамалінейна. Пры  $q_w = 0$  робіцца роўным нулю і значэнне  $q_{\text{ск}}$ , а пры  $q_w = \infty$  дасягае гранічнай велічыні і адпавядае значэнню пры  $C_k = 0$ . Трэба пры гэтым памятаць, што суадносіны (4) і (5) выведзены для прасцейшага выпадку паступлення хімічных элементаў у асобны карань, калі напрамку патокаў  $q_w$  і  $q_s$  супадаюць.

Калі карань праходзіць праз сухую зону глебы, дзе  $q_w$  набывае адмоўны знак, то, як гэта вынікае з (4), адмоўны знак набывае і  $q_{\text{ск}}$ . Аднак гэты выпадак ураўненне (4) не апісвае. Як адзначалася раней, ён апісваецца больш складанымі ўраўненнямі, аналіз якіх можа быць выкананы пасля іх лікавага рашэння, што ў сваю чаргу без ведання лікавых значэнняў параметраў  $\epsilon$  з'яўляецца праблематычным. Разам з тым з суадносін (5) відаць, што ў тым выпадку, калі другое складаемае ў дужках перавысіць па абсалютнай велічыні значэнне  $C_{\text{г}}$ , магчымы ад-

варотны паток разглядаемых хімічных рэчываў у глебу нават пры дадатным значэнні  $q_w$ .

Праведзены аналіз сведчыць пра тое, што, нягледзячы на спрошчаны падыход да мадэлявання паглынання каранем элементаў мінеральнага жыўлення, з суадносіна (4), (5) выцякае некалькі важных вывадаў. Першы вывад заключаецца ў тым, што інтэнсіўнасць паступлення мінеральных рэчываў у каранёвую сістэму вызначаецца не агульным, а ўдзельным, прыпадаючым на адзінку масы каранёў паглыннаннем вільга-



Мал. 2. Пераразмеркаванне радыенуклідаў па глебавым профілі (пад ячменем): 1 — цэзій-137, унесены ў слой 0,8—1,0 увесну 1991 г., пробы па профілі адабраны ўвесну 1993 г. (УГВ=1,4 м); 2 — сера-35, унесена 22.05.69 у слой 0,35—0,45 м, пробы па профілі адабраны 28.06.69 (УГВ=0,5—1,0 м); 3 — тое ж пры меншым узроўні ўнясення серы-35

ці. У сувязі з гэтым становіцца зразумелым, чаму ў доследах пры меншым агульным паглыннанні вільгаці ніжняй часткай каранёвай сістэмы ў параўнанні з яе верхняй часткай паступленне радыенуклідаў у яе аказалася параўнальным або нават большым, чым паглыннанне верхняй часткай. У практычным плане гэтыя абставіны патрабуюць асцярожных адносін да такога мерапрыемства, як заворванне забруджанага радыенуклідамі слоя на глыбіню 40—60 см. Вопыт сведчыць пра тое, што ў вільготныя сезоны заворванне бруднага слоя на глыбіню 40—60 см паніжае паступленне радыенуклідаў у прадукцыю шматгадовых траў у 2,0—2,5 раза, а ў засушлівыя — наадварот, павышае ў 1,5—2,0 раза ў параўнанні з іх размяшчэннем у ворным слоі. У шматгадовым разрэзе эфект паніжэння забруджанасці (да двух разоў) прадукцыі ад заворвання забруджанага слоя на глыбіню 50 см меў месца толькі для траў, вырашчаных на тарфяных і тарфяна-глеевых глебах, дзе падтрымліваюцца ўзровень грунтавых вод у межах 50—80 см. Другі вывад, які выцякае з мадэлі (1), заключаецца ў тым, што пры назапашванні некаторай колькасці разглядаемых элементаў у ліставой масе раслінаў іх паступленне разам з першаснымі асімілятамі ў флаэму караня павышае канцэнтрацыю ў ёй і тым самым паніжае паглыннанне элементаў з глебы. Больш таго, на ўчастках з адмоўным градыентам і адмоўным значэннем  $q_w$  можа адбывацца перанос рэчываў з караня ў глебу.

З мал. 2 відаць, што ўнесены ў слой глебы 80—100 см цэзій-137 праз два гады часткова перамясціўся ў верхні 0—30 см слой. Пры гэтым колькасць цэзію-137 у слоі глебы, размешчаным на глыбіні 30—60 см, аказалася практычна такой жа, як і да закладвання доследу. Разлікі паказалі, што колькасць цэзію-137 у слоі 0—30 см прыкладна ў 10 разоў перавысіла яго колькасць ва ўраджаі надземнай масы ячменю, атрыманай за два гады. Калі дапусціць, што ў каранёвай сістэме цэзію-137 было не больш, чым у надземнай масе, то можна сцвярджаць, што гэты элемент паступіў у сухія верхнія слаі глебы з каранёвай сістэмы. Яшчэ больш уражваюць даныя па міграцыі серы-35. Тут паступленне радыенукліду за кароткачасовы засушлівы перыяд аказалася параўнальным з яго колькасцю ў зыходна забруджаным слоі глебы.

Заўважым, што аналагічныя размеркаванні цэзію-137 і серы-35 па глыбіні глебы назіраліся і ў іншых доследах, дзе яны ўносіліся ў ніжнюю частку падворнага слоя. Натуральна меркаваць, што ў аналагічных

умовах у зоні паглынання вільгаці глебай з расліны паглынаюцца ёю не толькі элементы мінеральнага жыўлення, але і першасныя асімілянты (цукры). На карысць такога меркавання ўскосна сведчаць і вынікі даследаў па ўплыве адзінаразовага пад'ёму ўзроўняў грунтовых вод у засушлівы перыяд на прадукцыйнасць ячменю [2, 8]. Пад'ёмы УГВ нават на 10 см прыводзяць да паніжэння прадукцыйнасці гэтай культуры на 70% ад кантролю. Пры гэтым самыя вялікія страты назіраюцца на пад'ёмах УГВ у перыяды найбольш інтэнсіўнага нарастання біямасы. Растворачыцца гэта толькі адным пагаршэннем мінеральнага жыўлення, як гэта было зроблена ў [1, 2], наўрад ці магчыма.

З другога боку, заўважаны ў даследах эфект рэзкага паніжэння паступлення некаторых элементаў жыўлення ў расліны ў другой палове іх вегетацыі можа часткова растлумачвацца павышэннем іх канцэнтрацыі ў раствору, што паступае з лістоў у флаэму каранёў. У выніку гэтага памяншаецца перапад хімічнага патэнцыялу элемента паміж флаэмай і глебай і зніжаецца інтэнсіўнасць паступлення яго ў расліну. Паглынаны вільгаці каранёвай сістэмай у гэты час толькі інтэнсіфікуе кругаворот элементаў мінеральнага жыўлення паміж надземнай і падземнай часткамі расліны.

Не выклікае сумнення, што разгледжаныя вышэй заканамернасці масаабмену паміж раслінай і глебай павінны ўлічвацца пры распрацоўцы як метадаў аптымізацыі воднага і мінеральнага жыўлення расліны, так і спосабаў паніжэння паступлення ў яе радыенуклідаў. На жаль, пры размяшчэнні апошніх у ворным слоі гэтыя мэты ўступаюць у супярэчнасць, а іменна: павялічваючы інтэнсіўнасць паглынання элементаў жыўлення каранямі з гэтага слоя шляхам павелічэння паглынання вільгаці з яго, мы тым самым інтэнсіфікуем і паступленне ў расліну радыенуклідаў. Пры стымуляцыі паглынання вільгаці каранямі з ніжніх слаёў глебы фарміруюцца ўмовы для паніжэння інтэнсіўнасці прадукцыйнага працэсу. Таму рэжымы рэгулявання вільгаці глебы і мінеральнага жыўлення павінны быць кампраміснымі, яны абавязаны спрыяць фарміраванню высокага ўраджаю пры дапушчальнай колькасці ў ім радыенуклідаў. Паколькі цэзій-137, як і калій, назапашваецца ў пачатковы перыяд вегетацыі, то пажадана, каб падкормліванне калійнымі ўгнаеннямі было ажыццёўлена да пачатку вегетацыі сельгаскультуры. Пры гэтым у працэсе вегетацыі шляхам рэгулявання ўзроўняў грунтовых вод неабходна старацца за кошт стварэння магутнай каранёвай сістэмы забяспечваць высокі ўзровень паглынання вільгаці як з ворнага, так і з падворнага слоя глебы.

## Summary

The results of theoretical and experimental research on radionuclide transfer in a soil—plant system are given in the paper. Radionuclide redistribution is shown to take place along the vertical soil profile in the rotation process of mineral and organic substances and its mass exchange with soil. The necessity for taking into consideration phytoexchangeable mechanisms of radionuclide transfer when developing measures directed at reduction of their penetration into plants is noted.

## Літаратура

1. Шабан Н. С., Афанасик Г. И., Пятницкий В. Н. // Почвоведение. 1975. № 7. С. 101—106.
2. Афанасик Г. И., Шабан Н. С., Пятницкий В. Н., Трибис В. П. Комплексное регулирование условий жизни растений на торфяных почвах. Мн., 1980.
3. Афанасик Г. И. // Мелиорация и использование осушенных земель. Мн., 1970.
4. Мелвин-Хьюз Э. А. Физическая химия. Кн. 1. М., 1962.
5. Слейчер Р. Водный режим растений. М., 1970.
6. Габуда С. П. Связанная вода. Факты и гипотезы. Новосибирск, 1982.
7. Петербургский А. В. Агрохимия и физиология питания растений. М., 1971.
8. Дренаж сельскохозяйственных земель / Под ред. С. Ф. Аверьянова. Пер. с англ. М., 1964.