

ე. ჰვესიტაძე, რ. ბახოვიძე,
ბ. ხატიასვიანი, ბ. ჰვესიტაძე

დადაბინების

ეკოლოგიური და სანაწარმო
პროექტი

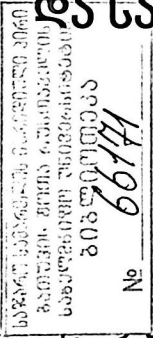


502.64/1642
დ-24

ე. კვესიტაძე, რ. გახოკიძე,
გ. ხატისაშვილი, გ. კვესიტაძე

დედამინის ეკოლოგიური

და სასურსათო პოტენციალი



რედაქტორები: აკადემიკოსი რამაზ ხეცურიანი
პროფესორი შოთა რუხაძე
პროფესორი ზურაბ ლომთათიძე

დედამიწის ეკოლოგიური და სასურსათო პოტენციალი

ავტორები: ე. კვესიტაძე, რ. გახოვიძე,
გ. ხატისაშვილი, გ. კვესიტაძე

რედაქტორები: აკადემიკოსი რამაზ ხეცურიანი
პროფესორი შოთა რუხაძე
პროფესორი ზურაბ ლომთათიძე

მონოგრაფია დასტამბულია შოთა რუსთაველის საქართველოს
ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით
გრანტი #SP-22-238

Monograph has been printed with financial support of Shota Rustaveli
National Science Foundation of Georgia
Number of Grant #SP-22-238

პირველი გამოცემა 2023

ტირაჟი 100

დაბეჭდილია სტამბაში „ფავორიტი სტილი“

ISBN: 978-9941-8-5527-6

სარჩევი

აბსტრაქტი	7
შესავალი	9
თავი 1. პლანეტის ეკოლოგიური პრობლემები	13
1.1. პრობლემების ზოგადი მიმოხილვა	13
1.2. გარემოზე უარყოფითად მოქმედი ფაქტორები	19
1.3 გარემოს ქიმიური გაბინძურების პრობლემა	21
1.4 ატმოსფერული ჰაერი	22
1.4.1. მჟავური წვიმები	25
1.4.2. სათბურის ეფექტი	26
1.4.3. სმოგი	28
1.4.4. მტვერი	31
1.4.5. ჰაერის გაბინძურება ნახშირწყალბადებით	32
1.4.6. ფოტოსინთეზის ეკოლოგიური მნიშვნელობა	34
1.5. ნიადაგი	37
1.5.1. ნიადაგის გაბინძურება სამხედრო მოქმედებებით	43
1.5.2. ნიადაგის გაბინძურება პესტიციდებით	45
1.5.3. ნიადაგის გაბინძურება ნავთობით	48
1.6. წყალი	51
1.7. ტოქსიკურ გამაბინძურებელთა გარემოში გავრცელება	58
1.7.1. ტოქსიკურ ნერთთა გეოგრაფიული და ბიოტური გადატანა	58

1.7.2. ტოქსიკურ ნაერთთა გადატანა ჰაერს, წიაღისა და წყალს შორის	64
1.7.3. ქიმიური ავარიები.....	73

თავი 2. ბუნებრივი და ტექნოგენური ტოქსიკური ნივთიერებები76

2.1 ბიოლოგიური წარმოშობის ტოქსიკური ნივთიერებები.....	77
2.2. მძიმე მეტალები.....	81
2.2.1. დარიშხანი	81
2.2.2. ტყვია.....	84
2.2.3. ვერცხლისწყალი.....	86
2.2.4. კადმიუმი	87
2.3. არომატული ნახშირწყალბადები.....	89
2.3.1. ბენზოლი.....	89
2.3.2. პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები (ჰან)....	91
2.4. პესტიციდები	93
2.5. ქლორორგანული ტოქსიკანტები	102
2.5.1. დიოქსინები.....	102
2.5.2. პოლიქლორირებული ბიფენილები	105
2.5.3. ქლორირებული ალკანები და ალკინები	106
2.6. ზედაპირულ-აქტიური ნივთიერებები	108
2.7 ფეთქებადი ნივთიერებები.....	109
2.7.1 2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (ტნტ)	110
2.10. ტოქსიკური აირები.....	113
2.10.1. გოგირდის დიოქსიდი.....	113

2.10.2. აზოტის ოქსიდები	114
2.10.3. ოზონი.....	118
2.10.4. ნახშირბადის მონოოქსიდი	119
თავი 3. ეკოლოგიურ ტექნოლოგიათა მრავალფეროვნება	121
3.1. ფიზიკური ტექნოლოგიები.....	125
3.2. ქიმიური ტექნოლოგიები.....	128
3.3. ბიოლოგიური ტექნოლოგიები.....	130
3.4. წყლის და ნიადაგის რემედიაციის ტექნოლოგიები	133
3.4.1. წყალი	133
3.4.2. ნიადაგი	141
3.5. მიკროორგანიზმების და მცენარეების მოქმედებაზე დაფუძნებული ინოვაციური ტექნოლოგიები.....	144
3.5.1. მცენარე - ტოქსიკურ ნაერთთა დეტოქსიფიკატორი.....	146
თავი 4. ახალი გლობალური ეკო-ბიოლოგიური კონცეფცია	164
4.1. მცენარეები და მიკროორგანიზმები	177
დასკვნა.....	188
ლიტერატურა.....	201

XXI საუკუნეში გაუარესებულმა ეკოლოგიურმა მდგომარეობამ და მასთან დაკავშირებულმა პრობლემებმა თითქმის ყველა მოქალაქის საარსებო გარემოს მიაღწია. ახალი ვირუსული დაავადებები, პლანეტის გლობალური დათბობის ნიშნები, მოსახლეობის არაპროგნოზირებადი ზრდა, ახალი მეგაპოლისების ჩამოყალიბება, მზარდი რაოდენობით ქიმიკატების წარმოება/გამოყენება, ტოქსიური ნაერთების არნახული რაოდენობრივი მატება ყველა ეკოლოგიურ ნიშაში, აგრარული პლანტაციების შემცირება და სხვა გადაიქცა გარემოს სასიცოცხლოდ აუცილებელი ბალანსის დაცვის საყოველთაო პრობლემად. განსაკუთრებით საყურადღებოა უახლოეს პერიოდში მოსალოდნელი სასმელი წყლის უკმარისობა, რასაც დღეს უკვე მწვავედ გრძნობს პლანეტის მოსახლეობის სულ ცოტა 60%.

და მაინც ხაზგასმით უნდა აღინიშნოს რომ ტექნოგენური ტოქსიკანტების განუწყვეტელი მატება, რაც დაკავშირებულია მრეწველობის განვითარებასთან, წარმოადგენს დიდ საშიშროებას არა მარტო ბიომრავალფეროვნების განადგურების, არამედ ყველა ორგანიზმის და, მათ შორის, ადამიანის ინტოქსიკაციის თვალსაზრისით. ყოველივე ეს მოქმედებს ადამიანის ფიზიოლოგიაზე, განსაკუთრებით მის გენომზე და აზროვნებაზე და, რა თქმა უნდა, იწვევს არაბუნებრივ და არაადამიანსიათებელ ფიზიოლოგიურ გადახრებს.

არსებული ეკოლოგიური ტექნოლოგიები (ფიზიკური (მექანიკური), ქიმიური) ვერ ახერხებს ტოქსიკური ნაკადის არათუ შეჩერებას, არამედ შემცირებასაც კი. აუცილებელია ხარისხობრივად ახალი, გლობალური ხასიათის ტექნოლოგიის ჩამოყალიბება, რომელიც პლანეტის მასშტაბს მოიცავს. სწორედ ამ პრობლემებს ეხება მონოგრაფიაში განხილული მასალა, სადაც წარმოდგენილია ავტორების მონაწილეობით შექმნილი ინოვაციური ბიოლოგიური პრინციპის მქონე გლობალური მასშტაბის ბიოტექნოლოგია. ტექნოლოგია ეყრდნობა სელექციურად შერჩეული მიკროორგანიზმების და ასევე მცენარეების განსაკუთრებული ფორმების ერთობლივ გამოყენებას ნიადაგისა და წყალსატევების გასასუფთავებლად ტოქსიკური ნაერთებისგან.

ნაშრომში განხილულია მიკროორგანიზმებისა და მცენარეების მოქმედება როგორც ინდივიდუალურად, ასევე ერთობლივად. დამტკიცებულია, რომ მათი ერთობლივი მოქმედება ატარებს სინერგისტულ ხასიათს.

წიგნი განკუთვნილია ქიმიის, ბიოლოგიის, აგრარული, ჯანმრთელობისა და გარემოს დაცვის სპეციალისტებისა და სტუდენტებისათვის.

შესავალი

წინამდებარე მონოგრაფია ეძღვნება კაცობრიობის საერთო პრობლემას, ყველა კონფესიის, ეროვნებისა და პოლიტიკური მრწამსის ადამიანებს, რაც მდგომარეობს ჩვენი საერთო სამყაროს ძირითადი ნაწილის - ბუნების კეთილდღეობაში. გეომრავალფეროვნებაზე დაყრდნობით, პლანეტა არსებითად განსხვავდება ნიადაგობრივ-კლიმატური პირობებით, ცალკეულ რეგიონთა ნიადაგების ქიმიური შედგენილობით და სხვა საარსებო პირობებით. ბუნებამ ხანგრძლივი ევოლუციით შექმნა სიცოცხლის სრულიად განსხვავებული, რიგ შემთხვევებში, საოცარი ფორმების მქონე არაჩვეულებრივი ბიომრავალფეროვნება. ბუნების დამახასიათებელ ნიშან-თვისებას წარმოადგენს ორგანიზმების მუდმივი სრულყოფის პრინციპი, რაც განპირობებულია ბუნებაში არსებული ქიმიური ნივთიერების ენერგიით და სპონტანური ქიმიურ-ბიოლოგიური პროცესებით. სწორედ ამ გზით ხდება სიცოცხლის ყველა ფორმის (უმარტივესიდან ურთულესამდე) ევოლუცია/განახლება.

ადამიანმა დაიწყო რა ბუნების თანდათანობით ათვისება, უმოწყალოდ, თავის ინტერესებიდან გამომდინარე, შეცვალა ბუნებისთვის დამახასიათებელი მრავალი პროცესი, რითაც არსებითად შეამცირა პლანეტაზე არსებული სასიცოცხლო ფორმების მრავალფეროვნება.

სადღეისოდ თავისი ხანგრძლივი არსებობის მანძილზე დაგროვილი ცოდნის და გამოცდილების საფუძველზე ადამიანი ერევა ბუნების არსებულ კანონებში მისი მოჩვენებითი კეთილდღეობის გაუმჯობესების მიზნით. სამწუხაროდ, კაცობრიობა ბუნებასთან მეგობრული ურთიერთობის ნაცვლად ცდილობდა თვითდამკვიდრებას და თავის დომინანტობას ანიჭებდა უპირატესობას.

ბოლო ათწლეულებს თუ არ ჩავთვლით, ვიდრე კაცობრიობა ეკოლოგიური კატასტროფის წინაშე არ აღმოჩნდა, არავის უფიქრია ჩვენი ლოგიკის და ცხოვრების ფილოსოფიის შეცვლა, რაც მიმართული იქნებოდა ბუნებათსარგებლობის რბილი ფორმებისკენ.

1650 წელს დედამიწაზე ცხოვრობდა დაახლოებით 500 მილიონი ადამიანი, 1920 წელს ჩატარებული აღწერის მიხედვით - 1 მილიარდ 800 მილიონი ადამიანი, ხოლო 1960 წელს 3 მილიარდს მიაღწია. ამჟამად პლანეტის მოსახლეობამ 8 მილიარდს გადააჭარბა, რაც 2-ჯერ მეტია 1971 წელთან შედარებით. პლანეტის მუდმივად მზარდი რაოდენობის მოსახლეობას ბევრი რამ სჭირდება: შესაბამისი გარემო, საკვები, ენერჯია, ტრანსპორტი და მთელი რიგი სამომხმარებლო და სოციალური საშუალებები, რაც კიდევ უფრო ამძიმებს გვარიანად შელახულ ეკოლოგიას.

რასთან მიგვიყვანა ბუნებასთან ასეთმა სამომხმარებლო დამოკიდებულებამ XXI საუკუნეში? ესენია: დიდი რეგიონების გაუდაბნობა და გადაგვარება, სადაც ადრე ყვაოდა აგრარულ პროდუქტებზე დაფუძნებული ეკონომიკა (აფრიკული კონტინენტის ჩრდილოეთი, საუდის არაბეთი და ცენტრალური აზიის ქვეყნები), თითქმის ამოშრა დიდი ტბები (არალის ზღვა, დიდი მარილიანი ტბა, ზონევილი, გრუმ ლეიქი, ლაბნორი და სხვ.). იცვლება ტემპერატურული რეჟიმი, ვეღარ მიიღწევა ნახშირბადოვანი ციკლის წრებრუნვის სრულად რეალიზება ჭარბი ნახშირბადის დიოქსიდის არსებობის გამო, რასაც თან ახლავს ყინულის დიდი მასივების ლღობა, ადრე უცნობი ინფექციური და სხვა დაავადებების გაჩენა; ნიადაგი და, შესაბამისად, შემცირებული მცენარეულობა იჟღინთება ტექნოგენური წარმოშობის სხვადასხვა ტოქსიკური (კანცეროგენური და სხვ.) ნივთიერებებით, რაც, საბოლოოდ, კვების ჯაჭვში ერთვება. გარემო ადამიანის საკუთრებად იქცა და სულ უფრო და უფრო ემორჩილება ადამიანური მოთხოვნილების არაბუნებრივ წესებს. ამის გამო მკაფიოდ ვლინდება ბუნების ეკოლოგიური დისბალანსი.

განსაკუთრებით მრავალრიცხოვანია ბუნებაში ეკოლოგიური დისბალანსის წარმოშობის მიზეზები. XXI საუკუნეში, გარდა ბუნებრივი პროცესებისა (მზის რადიაციის გავლენა, ვულკანური ამოფრქვევები და სხვ.), ბევრად მნიშვნელოვნად მოქმედებს ანთროპოგენური პროცესები. ტექნოგენურ ტოქსიკურ ნივთიერებებს, როგორც ადამიანის მოქმედების შედეგს, ძირითადი წვლილი მიუძღვის გლობალურ ეკოლოგიურ პრობლემათა ფორმირებაში, უარყოფითად მოქმედებს მეტაბოლური პროცესების მიმდინარეო-

ბაზე და იწვევს გახშირებულ მუტაგენურ გავლენას ყველა ორგანიზმის გენომზე. ყველა ეს ფაქტორი უარყოფითად მოქმედებს ადამიანის ფიზიოლოგიაზე, იწვევს ოზონის ფენის დაშლას, სათბურის ეფექტს, მჟავურ წვიმებს, ნიადაგების ეროზიას და დამლაშებას, ასევე სხვა არაბუნებრივ პროცესებს, რაც პირდაპირ უკავშირდება მთელი რიგი ცოცხალი ორგანიზმების სახეობის გაქრობას.

რა უნდა ვიღონოთ, რომ ავიცილოთ მოსალოდნელი ეკოლოგიური კატასტროფა? რა თქმა უნდა, პირველ რიგში, ეს არის ბუნებრივი რესურსების (წყალი, ნიადაგი, მინერალური რესურსები) რაციონალური და მზრუნველობითი გამოყენება; იმ სამრეწველო ტექნოლოგიების მაქსიმალურად კრიტიკული შეფასება, რომელთა მიერ გამოყოფილი ტოქსიკური კომპონენტები კვების ჯაჭვში ხვდება. ეკოლოგიურ პრობლემათა გადაჭრის დღეს არსებული ტექნიკური არსენალი არ იძლევა სიცოცხლისთვის ვარგისი ეკოლოგიური ბალანსის შენარჩუნების საშუალებას, რომელიც მუდმივად უარესდება. აუცილებელია გარემოს პრობლემათა ახალი რევოლუციური საშუალებების მოძიება, რაც დაფუძნებული იქნება ბუნებასთან „მეგობრული“ ურთიერთობის მქონე ტექნოლოგიებზე. გარემოში ტოქსიკური კომპონენტების მუდმივად მზარდი ემისიის მიზეზს წარმოადგენს სამრეწველო საწარმოების, ტრანსპორტის, აგრარული სექტორის, ენერგეტიკული კომპლექსების სწრაფი ზრდა.

ბოლო ათწლეულებში განსაკუთრებული ინტერესი ეთმობა ეკოლოგიურ ტექნოლოგიებში ბიოლოგიური პრინციპების გამოყენებას. ბუნებრივ გარდაქმნებზე დაფუძნებული, ბუნებისთვის მისაღები ბიოლოგიური ტექნოლოგიები შეუდარებლად ეფექტურია და, რაც მთავარია, თავისი მასშტაბებით ყველა ცნობილ კლასიკურ ტექნოლოგიაზე უფრო გლობალურია [1, 2].

30 წელზე მეტი ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე, ავტორებს წარმოდგენილი აქვთ რეალურად არსებული ეკოლოგიური პრობლემები და მეცნიერულად დასაბუთებული, ბუნების ცალკეული სეგმენტებისადმი უსაფრთხო, ბუნებრივი რესურსების დამზოგველი რემედიაციის ბიოლოგიური კონცეფცია, რომელიც ეფუძნება მიკროორგანიზმებს და მეცნარეებს, როგორც ნიადაგის, წყალსაცავების და ჰაერის გამწმენდ ეკოლოგიურ

აგენტებს. ეს ბიოლოგიური ტექნოლოგიები გულისხმობს დიდ ფართობებზე ვრცელი რეგიონალური ტერიტორიების სასიცოცხლოდ აუცილებელი ეკოლოგიური ბალანსის უზრუნველყოფას.

თავი 1

პლანეტის ეკოლოგიური პრობლემები

1.1. პრობლემების ზოგადი მიმოხილვა

მოსახლეობის არაპროგნოზირებადი ზრდა ყოველი ათწლეულის მანძილზე ცვლის პლანეტის რეალობას, ბუნებრივი ეკოსისტემების ჩანაცვლება ხდება მეგაპოლისებით, სატრანსპორტო, აგრარული, ენერგეტიკული და სხვა სამრეწველო ობიექტებით. ყოველივე ეს იწვევს გარემოს გაბინძურებას, ბიოლოგიური მრავალფეროვნების მოსპობას, აგრარული პლანტაციების მნიშვნელოვან შემცირებას.

გარემოს გაბინძურება დიდ ზიანს აყენებს მთელი პლანეტის ეკოლოგიას და უაღრესად ნეგატიურად აისახება მის მცხოვრებთა ჯანმრთელობაზე. ბუნების გაბინძურებაში უზარმაზარი წვლილი შეაქვს ენერგეტიკას, სოფლის მეურნეობას, მრეწველობას, ტრანსპორტს. ყოველწლიურად 1,8 მილიონზე მეტი ადამიანი იღუპება ფილტვების არაინფექციური დაავადებების შედეგად; პლანეტის 10 მცხოვრებიდან 9 სუნთქავს გაბინძურებულ ჰაერს; ფილტვების კიბოთი და რესპირატორული დაავადებებით გამოწვეული სასიკვდილო შემთხვევათა 70%-ზე მეტი გამოწვეულია ჰაერის გაბინძურების მაღალი დონით [2].

დღეს საერთაშორისო შეფასების თანახმად ეკოლოგიური თვალსაზრისით ყველაზე გაბინძურებული ქვეყნებია: ბანგლადეში, პაკისტანი, ინდოეთი, მონღოლეთი, ავღანეთი, ომანი, კატარი, ნეპალი.

უნდა აღინიშნოს, რომ ყველა ამ ქვეყნის ეკოლოგიური არაკეთილდღეობის მიზეზები საკმაოდ განსხვავებულია [3,4].

პაკისტანის ეკოლოგიური პრობლემები დაკავშირებულია ბუნებრივი რესურსების გამოფიტვასთან და ხანგრძლივ საომარ მოქმედებებთან. კატარი ბუნებრივი რესურსებით მდიდარი ქვეყანაა, მაგრამ დიდი მოცულობით ბუნებრივი აირის და ნავთობპროდუქტების გამომუშავებისას, კატარის საწარმოები ატმოსფეროში აფრქვევს დიდი რაოდენობით ტოქსიკურ ნაერთებს. ავღანეთში ეკოლოგიური სიტუაცია ბოლო ათეულ წლებში უშუალოდ დაკავშირებულია

ლია საომარ მოქმედებებთან. ბანგლადეში ძირითადად ზარალდება ბუნებრივი მიზეზებით, წყალდიდობებით და მეწყრებით. მონღოლეთში ტყეების ხანძრები და ხე-ტყის ჩეხვა არსებითად აუარესებს მთელი ქვეყნის ეკოლოგიას. ამ სიის გაგრძელება, შეიძლება, მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ ეკოლოგიური გაბინძურების მიზეზები არა მარტო ნავთობის საბადოებით და ბუნებრივი აირის არსებობითაა გამოწვეული.

გაეროს საყოველთაო მობილიზაციამ სიღარიბესთან ბრძოლაში ძირითადი მიზნის მისაღწევად წარმატებული შედეგი გამოიღო, თუმცა გარკვეული უთანასწორობა კვლავ შენარჩუნებულია.

2015 წლის 25 სექტემბერს გაერომ [5] წარმოადგინა ამოცანათა კომპლექსი, რომელიც შედგებოდა 17 პუნქტისგან და 196 ამოცანისგან. აქედან სამი პუნქტი, და რეალური აუცილებლობიდან გამომდინარე, ეს წინადადებები უშუალოდ დაკავშირებულია ეკოლოგიასთან:

პუნქტი 13. სასწრაფო ზომების მიღება კლიმატის ცვლილებასთან და მის შედეგებთან საბრძოლველად;

პუნქტი 14. ოკეანეების, ზღვების და საზღვაო რესურსების შენარჩუნება და რაციონალური გამოყენება მდგრადი განვითარების მიზნით;

პუნქტი 15. ხმელეთის ეკოსისტემის დაცვა, აღდგენა და მათი რაციონალური გამოყენებისთვის ხელშეწყობა. მაქსიმალური ხელშეწყობა გაეწიოს ტყეების რაციონალურ მართვას, გაუდაბნოების შეჩერებას, მიწების დეგრადაციის პროცესის შეწყვეტას და ბიოლოგიური მრავალფეროვნების შენარჩუნებას.

XXI საუკუნის დასაწყისში კაცობრიობა დადგა არნახული ეკოლოგიური პრობლემების წინაშე: კლიმატის ცვლილება, პლანეტის მოსახლეობის არაპროგნოზირებადი ზრდა, ყინულის დიდი მასივების ღლობა, სოფლის მეურნეობის მრეწველობის და ტრანსპორტის კოლოსალური ზრდა, დიდი რაოდენობის მეგაპოლისების შექმნა და სხვა მრავალი. ტოქსიკური ტექნოგენური ნივთიერებების დიდი რაოდენობით არსებობის გამო ნიადაგის დეგრადირება, გამოფიტვა ორგანული ნახშირბადის და აზოტისგან.

ეკოსისტემის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან კომპონენტს წარმოადგენს ნიადაგი, რომლის გაბინძურება ნავთობით და ნავთობპროდუქტებით, ჩვენი პლანეტის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პრობლემაა. ნავთობი გამოირჩევა მაღალი ტოქსიკურობით, ხოლო მისი

ცალკეული კომპონენტები (ნახშირწყალბადები) - განსაკუთრებით მაღალი მიგრაციული უნარით.

ნიადაგს, კაცობრიობისთვის განსაკუთრებული მნიშვნელობიდან გამომდინარე, სასიცოცხლო რესურსების შენარჩუნების თვალსაზრისით, ცენტრალური ადგილი უჭირავს ფაო-ს (FAO) დებულებაში [6].

ყველა ტიპის ნიადაგის ნორმალური დონის უზრუნველყოფისათვის აუცილებელი მახასიათებლებია:

1. წყლის და ქარით გამოწვეული ეროზიის მინიმალური დონე.
2. ნიადაგი არ უნდა იყოს დეგრადირებული, უნდა უზრუნველყოფდეს სტაბილურ ფიზიკურ გარემოს ჰაერის, წყლის და სითბოს მოძრაობისთვის და ბალახოვანი, ბუჩქოვანი და დიდი ხეების ზრდისთვის.
3. აუცილებელია ზედაპირული საფარის დაცვა ბალახოვანი მცენარეებით.
4. აუცილებელია ნიადაგის ორგანული ნივთიერების სტაბილური მარაგი, რომელიც შეესაბამება ადგილობრივი გარემოს ოპტიმალურ დონეს.
5. ნიადაგმა უნდა უზრუნველყოს საკვებ ნივთიერებათა საკმარისი რაოდენობით მიწოდება ყველა მცენარისთვის.
6. ნიადაგის მნიშვნელოვანი მახასიათებელია დამლაშების მინიმალური დონე.
7. ნიადაგი უნდა შეიცავდეს საჭირო რაოდენობით წყალს (ატმოსფერული ნალექები, წყლის დამატებითი წყაროები, ხელოვნური რწყვა).
8. ნიადაგის აუცილებელი მახასიათებელი უნდა იყოს ტოქსიკური ბუნების მქონე ნივთიერებათა შემცველობის ძალიან დაბალი დონე.
9. ნიადაგმა უნდა უზრუნველყოს არსებული ბიომრავალფეროვნების შენარჩუნება, ბიოლოგიურ ფუნქციათა სრული სპექტრით.
10. ზემოხსენებული მიზნების მისაღწევად აუცილებელია ნიადაგსარგებლობის ოპტიმალური თანამედროვე სისტემით უზრუნველყოფა.

შეინიშნება მკვეთრი კავშირი გლობალურ ეკოლოგიურ პრობლემებს, დემოგრაფიულ აფეთქებას და ტექნოლოგიების განვითარებას.

რებას შორის. რამდენიმე ათწლეულში ნავარაუდებია მსოფლიოს მოსახლეობის მინიმუმ ორჯერ გაზრდა. ამავე პერიოდში მნიშვნელოვნად მოიმატებს ადამიანის მიერ ბუნებისგან მიტაცებული ფართობები, მეგაპოლისები, ქარხნები, ნაგავსაყრელები და ა.შ.

ზუსტად უნდა აღინიშნოს დღევანდელი მდგომარეობისთვის დამახასიათებელი ძირითადი ეკოლოგიური პრობლემები, რომელთა შორის, პირველ რიგში, შეიძლება გამოიყოს გარემოზე ადამიანის ზემოქმედების შედეგები, რაც ვლინდება:

- ატმოსფერული ჰაერის გაბინძურებაში,
- სასმელი წყლების გაბინძურებასა და გამოლევაში;
- ნიადაგის საფარის გაბინძურებაში ტოქსიკური (ძირითადად, ტექნოგენური) ნივთიერებებით.

დაუშვებელია, ტერიტორიული თანაფარდობის დარღვევა არააგრარულ მრეწველობას, აგრარულ და თავისუფალ ეკოლოგიურ ტერიტორიებს (ტყეები, საძოვრები, მინდვრები, ტბები, მდინარეები) შორის, რაც ხშირად განსაზღვრავს მსხვილი რეგიონების ეკოლოგიურ ბალანსს.

თანამედროვეობის ეკოლოგიური დისბალანსის გამოსწორება დაკავშირებულია მდგრადი განვითარების გლობალურ პრობლემებთან. მუდმივი, ყოველმხრივი ყურადღება ეკოლოგიური პრობლემების მიმართ უკვე გახდა საყოველთაო, საერთაშორისო მოვლენა. შექმნილი ეკოლოგიური სიტუაციიდან გამომდინარე, საზოგადოების შემდგომი განვითარება შესაძლოა უპერსპექტივო გახდეს, თუ კონკრეტული ზომები არ იქნა მიღებული. კერძოდ, ყველა დამუშავებული ტექნოლოგია უნდა შეფასდეს ეკოლოგიური უსაფრთხოების თვალსაზრისით; აუცილებელია სასწრაფო ბუნებადაცვითი ღონისძიებების გატარება გარემოს რემედიაციისთვის, რომლებიც ასევე შეიცავს გარემოს დაცვის ორგანიზაციულ, ტექნიკურ და ინოვაციურ ტექნოლოგიებს.

გაბინძურებული ნიადაგების და გრუნტების ტოქსიკური ნაერთებისგან გაწმენდას განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა. ამ მიზნით, მთელ რიგ განვითარებულ ქვეყნებში (აშშ, კანადა, დასავლეთ ევროპის ქვეყნები, რუსეთი, იაპონია, სამხრეთ კორეა, ჩინეთი და სხვ.) შექმნილია სახელმწიფო ორგანიზაციები, სადაც დაწვრილებით შეისწავლება ნიადაგის მდგომარეობა და მუშავდება შესაძლო რემედიაციული ტექნოლოგიები და სხვა ღონისძიებები.

მიუხედავად გარემოს მრავალრიცხოვანი ეკოლოგიური გამაბი-
ნძურებლისა, ნავთობის და ნავთობპროდუქტების გადამუშავება და
გამოყენება - პლანეტის ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს პრობლემებას
წარმოადგენს და სპეციალურ განხილვას მოითხოვს. დედამიწის ზე-
დაპირზე ნავთობი და მისი გადამუშავების ნარჩენები გამოირჩევა
განსაკუთრებით დიდი მასშტაბებით და მაღალი ტოქსიკურობით,
ხოლო ცალკეული კომპონენტები (ტოქსიკური და კანცეროგენური
ნახშირწყალბადები) ხასიათდება მაღალი მიგრაციული უნარით.
ნავთობპროდუქტების წინამორბედი ორგანული მასის წარმოქმნა
ათასობით წლების განმავლობაში ანაერობულ პირობებში ხდებოდა.
ცხადია, ეს პირობები ეფუძნება ორგანულ ნივთიერებათა აღდგენით
რეაქციებს, სადაც გეოქიმიური პროცესებისთვის დამახასიათებელი
გარდაქმნები, უჟანგბადო არეში, ძალიან ნელი ტემპით მიმდინარე-
ობდა. უნდა აღინიშნოს, რომ ნავთობის მოპოვების და ტრანსპორტი-
რების დროს, ჰაერის ჟანგბადთან ინტენსიური კონტაქტის გამო, ნა-
ვთობის და ნავთობპროდუქტების მახასიათებლები იცვლება მასში
მიმდინარე ჟანგვითი პროცესების შედეგად.

ჩვენი პლანეტის მეორე, ასევე უმნიშვნელოვანეს გლობალურ
პრობლემას წარმოადგენს მტკნარი წყლის დეფიციტი. მოგეხსენე-
ბათ, რომ პლანეტის მოზინადრე ყველა ცოცხალი ორგანიზმისთვის
აუცილებელია მტკნარი წყალი, რაც მსოფლიოს მინიმუმ 40 ქვეყ-
ნისთვის ძლიერ დეფიციტური გახდა. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ქვე-
ყნების საერთო ტერიტორია მთელი პლანეტის არანაკლებ 60%-ს შე-
ადგენს. კაცობრიობა ყოველდღე მოიხმარს 10 მილიონ ტონაზე მეტ
სასმელ წყალს და ამ რიცხვს, პლანეტის მოსახლეობის ზრდასთან
ერთად, აქვს მუდმივი მატების ტენდენცია. მთელი პლანეტის პოპუ-
ლაცია გლობალურად ყოველწლიურად დაახლოებით 4 ტრილიონ
მ³ წყალს მოიხმარს.

ამჟამად განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს ცნება „ვირ-
ტუალური წყალი“, მოწოდებული პროფესორ ტ. ალანის მიერ [7]. ეს
იმ წყლის ჯამური მოცულობაა, რომელიც გამოიყენება საკვების ან
ნებისმიერი სხვა პროდუქციის საწარმოებლად, მაგალითად, 1 ტონა
ხორბლის მოსამწიფებლად საჭიროა 1000 ტონა წყალი, ხოლო 1 კი-
ლოგრამი შოკოლადის დასამზადებლად - დაახლოებით 24 ლიტრი.

გარემოსთვის წყლის რეზერვუარების და ნიადაგისთვის, გლობალური მასშტაბით, უდიდეს საფრთხეს წარმოადგენს სხვადასხვა

ანთროპოგენური გამაზინძურებელი ნივთიერებები, რომლებიც საკმაოდ სწრაფად ვრცელდება დიდ ტერიტორიებზე, რაც იწვევს როგორც ლოკალური, ისე გლობალური არასასურველი ჟანგვითი პროცესების დაჩქარებას ნიადაგში, წყლის გაზინძურებას და ოზონის ფენის მნიშვნელოვან დარღვევას [8].

მოსახლეობის არაპროგნოზირებადი ზრდა, მსხვილი ქალაქების, ქალაქთა აგლომერაციების და მეგაპოლისების არსებობა შესამაბისი ინფრასტრუქტურით უდავოდ წარმოადგენს გარემოს გაზინძურების ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს. ეკოლოგიური მდგომარეობა იმდენად გართულდა, რომ ევროკავშირში, სადაც ავტომანქანათა მიერ გამოყოფილი ნახშირორჟანგი შეადგენს ტექნოგენურ გამონაბოლქვ აირთა საერთო რაოდენობის 12%-ს, ავტომანქანათა მწარმოებელ კომპანიებს წაუყენეს მკაცრი მოთხოვნები. ამ მოთხოვნათა არსი ის არის, რომ გამონაბოლქვი აირების ინტენსივობა, რომელიც შეიცავს კანცეროგენურ ნივთიერებებს: ბენზ[ა]პირენს, ბენზ[ბ]ანტრაცენს, ნახშირბადის მონოოქსიდს, უნდა იყოს უმნიშვნელო, ხოლო ნახშირორჟანგი ფოტოსინთეზის საშუალებით მთლიანად გარდაიქმნას ბიოორგანულ ნაერთებად.

სერიოზულ ეკოლოგიურ დოკუმენტს წარმოადგენს ანგარიში, რომელიც წარმოდგენილია გაეროს პროგრამით გარემოს შესახებ (United Nations Environmental Programme, UNEP, 2009). მოხსენებაში განხილულია მთელი რიგი პოლიტიკური დოგმები, ეკონომიკის სტიმულირების და ერთდროულად მსოფლიო ეკონომიკის სტაბილურობის გაუმჯობესების მიზნით (GGND 9The Global Green New Deal) მთავრობებს თავაზობს სპეციალური ფინანსების გამოყოფას მწვანე სექტორისთვის სამი მიმართულებით: (1) ეკონომიკის აღდგენა (გაჯანსაღება); (2) სიღარიბის აღმოფხვრა; (3) ნახშირბადის ემისიის და ეკოსისტემის დეგრადაციის შემცირება; „მწვანე პროგრამების“ სტიმულირება და, ამგვარად, ადგილობრივი და საერთაშორისო ეკოლოგიური პოლიტიკის მხარდაჭერა [9].

2020 წელს დამტკიცდა მწვანე პაკტი ევროპისთვის (The European Green Deal), რომლის მთავარი მიზანია ევროპული კავშირის (EC) კლიმატის ნეიტრალურად გარდაქმნა 2050 წლისთვის. კლიმატის ცვლილება და გარემოს მდგომარეობის გაუარესება წარმოადგენს ეგზისტენციალურ საფრთხეს ევროპასა და მთელი მსოფლიოსთვის. მწვანე პაკტის რეალიზაცია ევროპული კავშირის თანამედროვე,

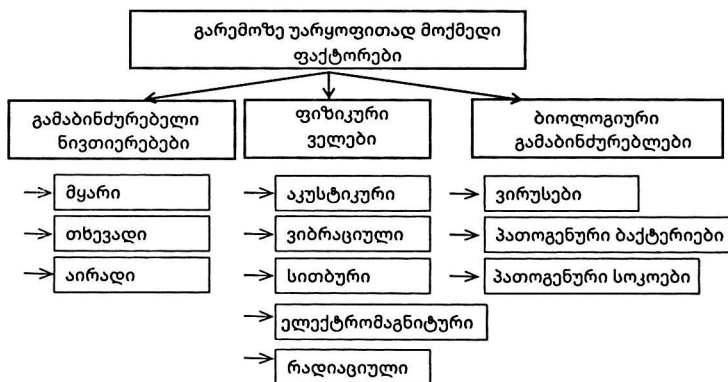
რესურსეფექტიან და კონკურენტუნარიან ეკონომიკას უზრუნველყოფს:

- 2050 წლისთვის სათბურის აირების გაფრქვევის შეწყვეტას;
- ბუნებრივი რესურსების უქონელი ქვეყნების ეკონომიკური ზრდის მიღწევას.

1.2. გარემოზე უარყოფითად მოქმედი ფაქტორები

გლობალური და რეგიონალური ეკოლოგიური პრობლემების გადაჭრის კომპლექსში მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ბუნებრივ მოვლენებს, მატერიალურ, ფიზიკურ, ბიოლოგიურ, სოციალურ და პოლიტიკური ხასიათის ფაქტორებს, რომლებიც უარყოფითად მოქმედებს გარემოზე.

გარემოზე ნეგატიურად მოქმედი ფაქტორები შეიძლება სამ ძირითად ჯგუფად დაიყოს (ნახ.1).



ნახ. 1. გარემოზე უარყოფითად მოქმედი ფაქტორები

პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება მექანიკური გამაბინძურებლები, რომლებიც აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით შეიძლება იყოს მყარი, თხევადი და აირადი. ბოლო დროს ამას დაემატა ქი-

მიური სინთეზით მიღებული კოლოსალური რაოდენობის პლასტიკური მასალები. პრობლემა იმაში მდგომარეობს, რომ ეს მასალები, დაშლის პროცესში მზის რადიაციის ზემოქმედებით გამოყოფს მეთანს და ეთილენს, რომლებიც ტიპურ სათბურის აირებს წარმოადგენს. ამ თვისებით განსაკუთრებით გამოირჩევა პოლიკარბონატი, აკრილპლასტი, პოლიპროპილენი, მაღალი და დაბალი სიმკვრივის პოლიეთილენები. დადგენილია, რომ მეთანი 30-ჯერ უფრო ძლიერი სათბურის აირია, ვიდრე ნახშირბადის დიოქსიდი.

დასაბუთებული წარმოდგენების თანახმად, მეთანის ანთროპოგენური გამონაბოლქვები წარმოადგენს გლობალური დათბობის ეფექტის სერიოზულ მიზეზს [10].

მეორე ჯგუფში შედის ფიზიკური ველები, რომლებიც იყოფა შემდეგ სახეობებად:

- აკუსტიკური ტალღები – წარმოადგენს ბგერითი ტალღების სხვადასხვა წყაროების ზემოქმედების შედეგს;
- ვიბრაციული ტალღები, რომლებიც დრეკადი მექანიკური რხევების მიზეზია;
- სითბური ველი – წარმოიქმნება გარემოს ტემპერატურის მატების შედეგად;
- რადიაციული ველი – წარმოიქმნება რადიოაქტიული გამოსხივების მოქმედებით.

მესამე ჯგუფს მიეკუთვნება ბიოლოგიური გამაბინძურებლები, პათოგენური მიკროორგანიზმების (ვირუსები, ბაქტერიები, მიცელიალური სოკოები, ფიტოპათოგენური მწერები) სხვადასხვა ფორმები, რომლებიც აუარესებენ ეკოსისტემის ეკოლოგიას, წარმოადგენენ ბუნებრივ ნაერთთა ბიოლოგიური ლპობის, ინფექციურ დაავადებათა წყაროს და უარყოფითად მოქმედებენ ადამიანის, ცხოველების და ყველა ორგანიზმის ფიზიოლოგიაზე. ჩამოთვლილი ფაქტორები არა მხოლოდ უარყოფითად მოქმედებს ადამიანის ორგანიზმზე, არამედ, აუარესებს ეკოლოგიურ მდგომარეობას რეგიონალურ დონეზე, რითაც ხელს უწყობს მოსახლეობაში სხვადასხვა ინფექციურ დაავადებათა გავრცელებას; განსაკუთრებით სერიოზულ ზიანს აყენებს მსხვილ ქალაქებს და მეგაპოლისებს.

1.3 გარემოს ქიმიური გაბინძურების პრობლემა

ნებისმიერი გამაბინძურებელი აგენტი წარმოადგენს ქიმიურ ნივთიერებას, ფიზიკურ ფაქტორს ან ორგანიზმს და ხასიათდება შესაბამისი ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური მახასიათებლებით.

გამაბინძურებელი ნივთიერებები სხვადასხვა ნიშნით კლასიფიცირდება. პირველი და მთავარი ნიშანი - გამაბინძურებლის აგრეგატული მდგომარეობა: აირადი, თხევადი და მყარი. გამაბინძურებელი კომპონენტების სხვა მნიშვნელოვან ნიშანს წარმოადგენს მათი ბუნებრივი ან ანთროპოგენური წარმომავლობა. სწორედ ეს ფაქტორი მნიშვნელოვანწილად განსაზღვრავს ტოქსიკურ ქიმიურ ნაერთთა ძალიან ფართო სპექტრის სტაბილურობას.

ბუნებრივი გამაბინძურებელი ნივთიერებებია ორგანიზმის ცხოველმყოფელობის, ვულკანების ამოფრქვევის, ტყის ხანძრების, ქვიშიანი ქარიშხლების და სხვა ბუნებრივი მოვლენების პროდუქტები, რის შედეგადაც ირღვევა წონასწორობა და გარემოში იქმნება ნივთიერებებსა და ფიზიკურ ფაქტორებს შორის დისბალანსი. ამ დროს არავითარი ახალი, ადრე უცნობი ნივთიერება არ წარმოიქმნება.

შედარებით უფრო ძლიერ, სტაბილურ ეკოლოგიურ საშიშროებას წარმოადგენს დიდი რაოდენობით გავრცელებული ანთროპოგენური გამაბინძურებელი ნივთიერებები. ამ ნივთიერებათა კონცენტრაცია ბუნებაში პერმანენტულად მატულობს და, რიგ შემთხვევებში, გარემოს ბუნებრივი ბალანსის ცვლილების ძირითადი მიზეზია. ცალკეულ რეგიონებში ეს ნივთიერებები გროვდება დიდი რაოდენობით და გამოირჩევა სივრცეში არათანაბარი განაწილებით, სხვადასხვა ქიმიური შედგენილობით, ბიოდეგრადაციის სხვადასხვა უნარით.

გარემოს ძირითადი ბუნებრივი გამაბინძურებელი ნივთიერებებია: მეთანი (როგორც მიკროორგანიზმების გენერირების პროდუქტი), ტოქსიკური აირები და მყარი ნაწილაკები (ვულკანთა ამოფრქვევის, ბუნებრივად გაჩენილი ხანძრების, სილიანი ქარიშხლების შედეგად), ნავთობი (მისი მოპოვებისა და ტრანსპორტირებისას ავარიული გაჟონვა ნიადაგში, მდინარეებსა და ზღვებში), მძიმე მეტალები (მადნის ჩარეცხვის, წყალდიდობების და მეწყრების დროს) და სხვ.

გამაბინძურებელ ნივთიერებათა უარყოფითი შეფასების კრიტერიუმს წარმოადგენს მათი ზემოქმედება გარემოზე, რაც ასახულია ტოქსიკურობის კლასიფიკატორებში. სწორედ ეს კლასიფიკაცია, პირველ რიგში, განიხილავს გამაბინძურებელ ნივთიერებათა ქიმიურ თვისებებს და ეფუძნება ნივთიერების საშუალო მომაკვდინებელი დოზის სიდიდის დადგენას სასუნთქი გზებით (ინჰალაციურად), კანით (პერკუტანულად) ან კუჭნაწლავის ტრაქტით (პერორალურად) ადამიანის ორგანიზმში მოხვედრისას [22].

ტოქსიკურობის კლასისადმი მიკუთვნებისას ყურადღებას აქცევენ ორგანიზმში მოხვედრის იმ გზას, რომლის დროსაც გამაბინძურებელი ნივთიერება ტოქსიკურობის ყველაზე დიდ ეფექტს ავლენს. ტოქსიკურობის ხარისხის მიხედვით ატმოსფერული ჰაერის გამაბინძურებელ ნივთიერებებს, რომელთაც ახასიათებს ნათლად გამოკვეთილი ტოქსიკური თვისებები (ტოქსიკანტები), შემდეგ კლასებად ყოფენ [23]:

- უაღრესად ტოქსიკური (I კლასი);
- მაღალტოქსიკური (II კლასი);
- ზომიერად ტოქსიკური (III კლასი);
- მცირედ ტოქსიკური (IV კლასი).

1.4 ატმოსფერული ჰაერი

ბიოსფეროს ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი კომპონენტია ატმოსფერული ჰაერი. კაცობრიობის არსებობის მთელი ისტორიის მანძილზე, მიუხედავად დედამიწაზე მიმდინარე ქაოსური, გეოლოგიური, კლიმატური პროცესებისა, არ მომხდარა ჰაერის ძირითადი კომპონენტების (აზოტი, ჟანგბადი, ნახშირბადის დიოქსიდი, არგონი) კრიტიკული, რაოდენობრივი ცვლილება. ეს უდავოდ წარმოადგენს ბუნების თვითრეგულაციის, თვითაღდგენის და მთელი პლანეტის ეკოლოგიური ბალანსის მოწესრიგების ფენომენალური უნარის შედეგს.

დიდი ალბათობით შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ჰაერის შედგენილობის თუნდაც უმნიშვნელო ცვლილებები შეიძლება გახდეს ორგანიზმებზე ზემოქმედების ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური

ცვლილებების მიზეზი, რაც გამოიწვევს მრავალი ორგანიზმის არსებული პირობებისადმი ადაპტირებული სპექტრის დარღვევას (შემცირებას).

ატმოსფეროს ქიმიურ შედგენილობაზე გავლენას ახდენს ნებისმიერი არაბუნებრივი აირადი ნივთიერება, რომელიც გარდა მექანიკური შერევისა, ქიმიურად ურთიერთმოქმედებს ჰაერის შემადგენელ კომპონენტებთან. ჰაერში არსებულ აირებზე მოქმედებს გრძელ და მოკლეტალღიანი სხივები, რაც ანეიტრალებს მათ მოქმედებას დედამიწაზე არსებული სიცოცხლის ყველა ფორმაზე.

ცნობილია 3000-ზე მეტი ნივთიერება, რომლებიც უარყოფითად მოქმედებს ატმოსფერული ჰაერის ვარგისიანობაზე. ეს ნივთიერებები, პირველ რიგში, აბინძურებს ჰაერს, შედის რეაქციაში ჰაერის კომპონენტებთან, ამცირებს მათ კონცენტრაციას ჰაერში და წარმოქმნის ატმოსფერული ჰაერისთვის ახალ, არაადაპტაციურად კომპონენტებს.

გარდა ზემოაღნიშნულისა, გამაბინძურებლებს წარმოადგენს ზოგიერთი ნივთიერება, რომლებიც, ჩვეულებრივ, შედის ატმოსფეროს განსაზღვრულ ფენებში (მაგალითად, ოზონი სტრატოსფეროში, ტროპოსფეროში მისი მოხვედრის შემდეგ).

ატმოსფეროს გამაბინძურებელ აირთა მთავარი წყაროები მრავალფეროვანია, ესენია: სამრეწველო პროცესთა დიდი ნაწილი; ბენზინის და დიზელის საწვავებზე მომუშავე ტრანსპორტის გამოწვევა; ვულკანების ამოფრქვევა; დედამიწისთვის უჩვეულო კოსმოსიდან შემოჭრილი ნაწილაკები; პათოგენური მიკროორგანიზმების მიერ ბუნებაში ბიოლოგიური პროცესები (ლპობა, ბიოლოგიური ჟანგვა და სხვა მიკრობიოლოგიური პროცესები).

არნახული ტემპებით და მასშტაბებით მრეწველობის განვითარებამ გამოიწვია ატმოსფეროში მრავალფეროვან ტექნოგენურ ნივთიერებათა გავრცელება, რომელთაც მიეკუთვნება, მაგალითად, ქლორი, რომელსაც ინტენსიურად იყენებენ ქიმიურ მრეწველობაში. მიუხედავად ჰაერსა და ნიადაგში მისი მცირე კონცენტრაციისა, ეს ჰალოგენი დიდ საშიშროებას წარმოადგენს ბუნებრივ პირობებში - იგი წარმოქმნის ქლორორგანულ ნერთებს, რომლებიც ხვდება კვებით ჯაჭვში და უკიდურესად უა-

რყოფითად მოქმედებს ადამიანის და ცხოველების ჯანმრთელობაზე.

განსაკუთრებული ტოქსიკურობა ახასიათებს ტექნოგენურ ნივთიერებათა ჯგუფს, რომელთაც დიოქსინები ეწოდებათ. ეს ქლორორგანული ნივთიერებათა განსაკუთრებული ჯგუფია, რომელიც გამოირჩევა მაღალი მდგრადობით და მოქმედების ხანგრძლივობით ათეული წლების განმავლობაში.

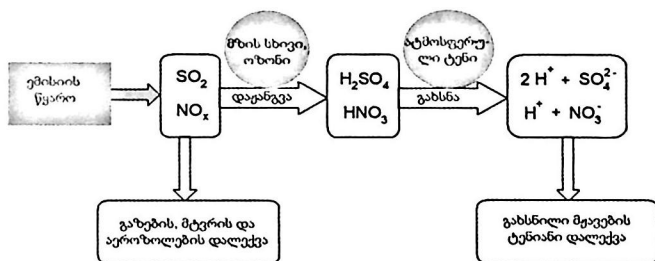
ატმოსფერული ჰაერის გამაბინძურებელი ყველაზე გავრცელებული ანტროპოგენური ნივთიერებებია:

- ატმოსფეროში - აირადი ნივთიერებები (გოგირდის დიოქსიდი, ნახშირბადის და აზოტის ოქსიდები), მყარი ნაწილაკები (მტვერი, მური, მძიმე მეტალთა ნაერთები), ორგანული ნაერთები, მათ შორის, რომლებიც იწვევს ფოტოქიმიური სმოგის და ატმოსფეროს ოზონის ფენის დაშლას;
- ჰიდროსფეროში - ხსნადი და უხსნადი აირადი ნივთიერებები (ქლორის ნაერთები, გოგირდწყალბადი, ოზონი, წყალბადი), შეწონილი მყარი ნივთიერებები და მძიმე მეტალთა ხსნადი მარილები, თხევადი გამაბინძურებელი ნივთიერებები (ნავთობპროდუქტები, ზეთები, მჟავები, ტუტეები, ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები);
- ლითოსფეროში (განსაკუთრებით, მის ნაყოფიერ ფენაში - ნიადაგში): - აირადი ნივთიერებები (ქლორი, ამიაკი და აზოტის ოქსიდები), შეწონილი მყარი ნივთიერებები და მძიმე მეტალთა ხსნადი მარილები, თხევადი გამაბინძურებელი ნივთიერებები (ნავთობპროდუქტები, მჟავები, ტუტეები, პესტიციდები).

სწორედ გარემოს ანტროპოგენური გაბინძურება და, პირველ რიგში, ჰაერის და ნიადაგის აირადი, თხევადი და მყარი ნივთიერებებით (წვრილდისპერსიული მტვერი), რომელიც აზიანებს მოსახლეობის ჯანმრთელობას, რჩება პრიორიტეტული სოციალური და ეკონომიკური მნიშვნელობის მქონე ყველაზე მწვავე ეკოლოგიურ პრობლემად [11].

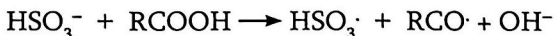
1.4.1. მჟავური წვიმები

პლანეტის ეკოლოგიურ მდგომარეობას მნიშვნელოვან ზიანს აყენებს მჟავური წვიმები, რომელთა წარმოქმნაც ატმოსფეროში გოგირდის დიოქსიდის და აზოტის ოქსიდების (NO_x) ატმოსფეროში გაფრქვევასთან არის დაკავშირებული. ეს ოქსიდები ჰაერში მთელ რიგ ქიმიურ გარდაქმნებს განიცდის, რომელთა შორის უმთავრესია ჟანგვა და წყალთან ურთიერთქმედება, რაც ე.წ. „მჟავურ წვიმებს“ იწვევს. ეს რეაქციები ულტრაიისფერი სხივების, ჰაერის ჟანგბადის ან ოზონის მონაწილეობით მიმდინარეობს (ნახ. 2).



ნახ. 2. მჟავური წვიმების წარმოქმნის მექანიზმი [12]

გამოთვლილია, რომ მჟავურ წვიმათა 60-70% გამოწვეულია გოგირდის დიოქსიდით. SO_2 და მჟავური ნალექები იწვევს მეტალის ნაკეთობათა და ორგანულ მასალათა (ტყავი, ქაღალდი, ქსოვილები, რეზინები, საღებავები) კოროზიას. ისინი მნიშვნელოვან ზიანს აყენებენ ფოტოსინთეზის პროცესში მონაწილე ორგანიზმებს. მცენარეებისთვის განსაკუთრებით ტოქსიკურია ჰიდროსულფიტ-იონები (HSO_3^-), რომლებიც მოქმედებს ფოსფოლიპიდების არანაჯერ ცხიმოვან მჟავებთან, წარმოქმნის რადიკალებს და შლის ბიომემბრანებს:



$\text{HSO}_3\cdot$ და $\text{RCO}\cdot$ რადიკალები ქლოროპლასტთა მემბრანების დაზიანებასთან ერთად იწვევს ქლოროფილის ჟანგვას და გაუფე-

რულებას. გარდა ამისა, SO_2 -ის გარდაქმნის პროდუქტები ხელს უწყობს ციტოპლაზმის pH-ის გადახრას მჟავურ მხარეს, რაც იწვევს ქლოროფილის პორფირინული ციკლიდან მაგნიუმის იონების მოცილებას. HSO_3^- იონები იწვევს კალციუმის ციკლში CO_2 -ის ფიქსაცი-
აში მონაწილე ფერმენტების ინჰიბირებას. ამიტომ SO_2 -ის მოქმედე-
ბით ფოთლები ყვითლდება და კარგავს ფოტოსინთეზის უნარს. გოგირდის დიოქსიდი ამცირებს უჯრედის მემბრანებს შორის ნი-
ვთიერებათა ტრანსპორტის ინტენსიურობას.

მჟავური ნალექების ფორმაში გადასული აზოტის ოქსიდები სე-
რიოზულ ზიანს აყენებს მცენარეებს, ზრდის მჟავიანობას, როგორც SO_2 -ის მოქმედების შემთხვევაში ხდება. მცენარეთა პირდაპირი კონტაქტი NO_x -თან სწრაფად ვლინდება ფოთლების ან წიწვოვან მცენარეთა წიწვების გაყვითლებით ან გამუქებით. შეფერილობის ასეთი ცვლილების მიზეზია a და b ქლოროფილების ფეოფიტინე-
ბად გარდაქმნა და კაროტინოიდების დაშლა. ეს პროცესი გამოწვე-
ულია ცხიმოვან მჟავათა ჰიდროპეროქსიდული წარმოებულებით ან ცხიმოვან მჟავათა რადიკალებით. ცხიმოვან მჟავათა დაჟან-
გვა, რომელიც ქლოროფილის ჟანგვასთან ერთად მიმდინარეობს, იწვევს მემბრანების დაშლას და ნეკროზს.

1.4.2. სათბურის ეფექტი

ჰაერში მხოლოდ ტოქსიკური აირების კონცენტრაციის გაზ-
რდა არ იწვევს ეკოლოგიური პრობლემების ინიცირებას. ამის მაგა-
ლითია ნახშირორჟანგი, რომელიც ტოქსიკურობით არ გამოირჩევა, მაგრამ მომატებული რაოდენობისას უარყოფითად მოქმედებს გა-
რემოზე.

გამოთვლების თანახმად, CO_2 ატმოსფეროში საშუალოდ 2-4 წელი ცირკულირებს და ინტენსიურად ვრცელდება დიდ ფართო-
ბებზე. გარემოზე CO_2 -ის უარყოფითი გავლენა გამოიხატება არა მარტო უშუალოდ ცოცხალ ორგანიზმებზე ტოქსიკურ ზემოქმე-
დებაში, არამედ ინფრაწითელი (იწ) სხივების შთანთქმის უნარი-
თაც. მზის სხივებით დედამიწის ზედაპირის გაცხელების შემდეგ სითბოს ნაწილი იწ გამოსხივების სახით უბრუნდება კოსმოსურ

სივრცეს. აირები, რომლებიც იწ გამოსხივებას შთანთქავს, ხელს უშლის დედამიწიდან ამ სითბოს მოცილებას, რის გამოც ჰაერის ტემპერატურა იზრდება და ადგილი აქვს ე. წ. „სათბურის ეფექტს“, რაც კლიმატის ცვლილებისა და გლობალური დათბობის ერთ-ერთი უმთავრესი მიზეზია [15]. ამიტომ ნახშირბადის დიოქსიდი ე. წ. „სათბურის აირებს“ მიეკუთვნება [16].

კლიმატის გლობალური ცვლილებების პრობლემასთან დაკავშირებით 1992 წელს მსოფლიოს წამყვანი ქვეყნების მიერ ხელმოწერილი იქნა ე. წ. „კიოტოს ოქმი“, რაც ატმოსფეროში ნახშირბადის დიოქსიდის გაფრქვევის შემცირებისაკენ მიმართულ შეთანხმებათა პაკეტს წარმოადგენს.

ატმოსფერული CO_2 მუდმივად მიმოიცილება ჰაერს, ნიადაგს, წყალსა და ცოცხალ ორგანიზმებს შორის. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი როლი ბუნებაში მიმდინარე ნახშირორჟანგის წრებრუნვაში მცენარეებს ეკუთვნის ფოტოსინთეზის გამო. CO_2 -ის წარმოქმნის ბუნებრივ რესურსს წარმოადგენს: ვულკანური ამოფრქვევები, ნახშირბადშემცველი მთის ქანების გამოფიტვა, ორგანულ ნაერთთა ლპობა (მიკრობიოლოგიური დაშლა), სუნთქვის პროცესი, ტყის ხანძრები და საწვავის წვა. ცხადია, ყოველივე ეს გამოიწვევდა CO_2 -ის რაოდენობის კატასტროფულ რაოდენობით დაგროვებას, თუ არა ატმოსფეროდან მისი ფიქსაციის პროცესები - ფოტოსინთეზი და CO_2 -ის ზღვის წყალში გახსნის პროცესი [17, 18].

ნახშირბადის დიოქსიდის გამოყოფასა და მისი შებოჭვის პროცესებს შორის ბუნებაში დამყარდა წონასწორული მდგომარეობა, რაც დამახასიათებელია, როგორც მატერიკებისთვის, ისე ოკეანეებისთვის. ასეთ მიმოცვლით პროცესში ჩართულია მთელი ბიომასის საერთო ნახშირბადის მხოლოდ ნაწილი. პროცესში მონაწილე ნახშირბადის არაპროგნოზირებადმა ზრდამ გამოიწვია ატმოსფეროში CO_2 -ის შემცველობის საგრძნობი მატება. სხვა მიზეზებიდან შეიძლება აღინიშნოს ისეთი ნიადაგების ფართობის შემცირება, რომლებიც CO_2 -ის ფიქსაციაში მონაწილეობდა (ურბანიზაციის გამო), ტყეების კაფვა, განსაკუთრებით, ტროპიკული მცენარეულობის განადგურება. ყოველივე ეს მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს ნახშირბადის შებოჭვასა და მის წარმოქმნას შორის ეკოლოგიური წონასწორობის დარღვევას.

1996 წელს უჩვეულო ექსპერიმენტი იქნა ჩატარებული დიდ ბრიტანეთში: CO₂, რომელიც წარმოიქმნა ნავთობის და ბუნებრივი აირის წვის შედეგად, დიდი რაოდენობით ჩატუმბეს წყალქვეშა სივრცეში. ამ ტექნოლოგიის ავტორთა აზრით, CO₂-ის „დამარხვის“ ასეთი მეთოდი ფართო გავრცელებას პოვნებს უახლოეს მომავალში და პრობლემის გადაჭრის ერთ-ერთი გზა გახდება.

1.4.3. სმოგი

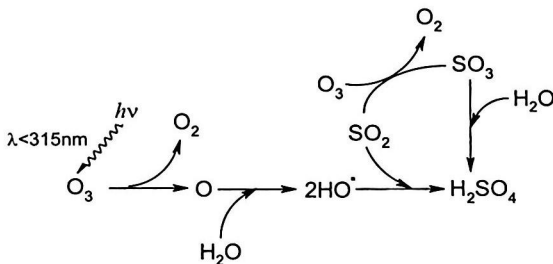
ატმოსფეროში, სხვა ეკოსისტემებთან შედარებით, ემისიური ქიმიური ტოქსიკანტების განაწილება ბევრად სწრაფად ხდება. ტოქსიკანტების კონცენტრირება ხანმოკლე პროცესია და, ძირითადად, შეიმჩნევა ემისიის კერასთან ახლოს. თუმცა, ზოგიერთ ფიზიკურ-ქიმიური, გეოგრაფიული და მეტეოროლოგიური ფაქტორებს ასევე შეუძლია გამოიწვიოს ჰაერის ხანგრძლივი, ლოკალური გაბინძურება. ამის მაგალითია სმოგი.

სმოგი (ტერმინი მიღებულია ინგლისური სიტყვების შეერთებით: smoke + fog, ე.ი. კვამლი + ნისლი) აირთა ნარევია, რომელიც წარმოადგენს მოყავისფრო-მოყვითალო ან მუქ ნისლს დიდ ქალაქებსა და სამრეწველოს ცენტრებში. არსებობს ორი ტიპის სმოგი:

1. ლონდონური ტიპის სმოგი წარმოადგენს სქელ ნისლს კვამლისა და წარმოების აირადი ნარჩენების მინარევებით. იგი წარმოიქმნება შემოდგომის და ზამთრის პერიოდებში საშუალო და ჩრდილოეთ განედის ქალაქებში, ჰაერის ძლიერი გაბინძურების შედეგად. ასეთი სმოგი წარმოადგენს აეროზოლს, რომელშიც ჭარბობს SO₂, H₂SO₄ და ჭვარტი.
2. ლოს-ანჯელესური ტიპის ანუ ფოტოქიმიური სმოგი აეროზოლია (ნისლის გარეშე), რომელიც ტოქსიკურ აირებს მაღალი კონცენტრაციით შეიცავს. იგი წარმოიქმნება მზის ულტრაიისფერი გამოსხივებით გამოწვეული ფოტოქიმიური რეაქციების შედეგად, რომლებშიც ძირითადად მონაბოლქვი აირების კომპონენტები მონაწილეობს. სმოგის ეს ტიპი დამახასიათებელია სამხრეთის ქალაქებისთვის მზიან, ზაფხულის თვეებში. ფოტოქიმიურ სმოგში შედის აზოტის ოქსიდები, ოზონი, პეროქსიაცეტილნიტრატი და სხვადასხვა რადიკალები.

სმოგი წარმოიქმნება იმ რეგიონებში, სადაც ჰაერის ანთროპოგენური გაბინძურება ძლიერდება ადგილმდებარეობის (მთები, რომლებიც აფერხებს ჰაერის ნაკადებს) გეოგრაფიული თავისებურებებით და მეტეოროლოგიური პირობებით (ტემპერატურული ინვერსიები ტროპოსფეროში, რომლებიც ხელს უშლის ვერტიკალური მიმართულებით აირების განაწილებას) და ხელს უწყობს ჰაერის გამაბინძურებლების ემისიას. სმოგი, ჩვეულებრივ, შეიქმნება ჰაერის სუსტი ტურბულენტობის, სუსტი ქარის ან წყნარი ამინდის პირობებში. სმოგი აქვეითებს ხილვადობას, აძლიერებს მეტალების და დანადგარების კოროზიას, ანადგურებს მცენარეულ საფარს, აღიზიანებს სასუნთქ გზებს. ინტენსიური და ხანგრძლივი სმოგი შეიძლება ქრონიკული ხასიათის დაავადებათა გართულების მიზეზი აღმოჩნდეს.

ლონდონის ტიპის სმოგის წარმოქმნას ხელს უწყობს ნოტიო ჰაერი და გოგირდის დიოქსიდის გამონაბოლქვები ზამთრის გათბობის სეზონის პერიოდში. ასეთი სმოგის ფორმირების პროცესი შეიძლება შემდეგი სახით წარმოვიდგინოთ (ნახ. 3):



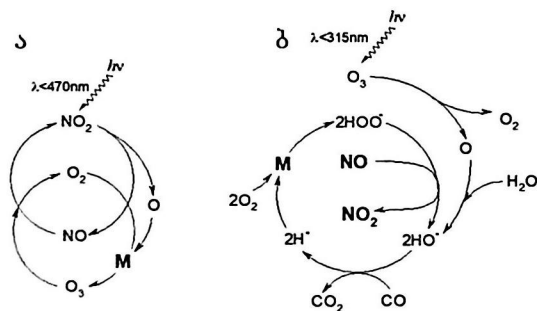
ნახ. 3. ლონდონის ტიპის სმოგის კომპონენტა ფორმირების სეგმენტი

315 ნმ-ზე ნაკლები ტალღის სიგრძის უი-სხივების ზემოქმედებით ოზონი იშლება ჟანგბადის ალგუნებული ატომის სინგლეტურ მდგომარეობაში გამოთავისუფლებით, რომელიც წყლის ატმოსფერულ ორთქლთან წარმოქმნის მაღალი რეაქციის უნარის მქონე

ჰიდროქსილის რადიკალებს (HO). ეს რადიკალები იოლად ჟანგავს გოგირდის დიოქსიდს გოგირდმჟავად. ამ დროს შესაძლებელია ოზონით SO₂-ის დაჟანგვაც, ხოლო წარმოქმნილი გოგირდის ანჰიდრიდი (SO₃) აქტიურად უერთდება წყალს და გოგირდმჟავას წარმოქმნის. საბოლოოდ, გოგირდის ოქსიდები და მჟავები ჰვარტლთან და წყლის ორთქლთან ერთად წარმოქმნის მკვრივ აეროზოლს, რომელიც სმოგის ძირითადი ნაწილია.

ფოტოქიმიური სმოგი რთული შედგენილობისაა. იგი წარმოიქმნება ასამდე ტოქსიკური ნივთიერების და ძლიერ მაღალი ჟანგვითი უნარის მქონე რადიკალებისგან. ფოტოქიმიური სმოგის წყაროს, ძირითადად, წარმოადგენს აზოტის ოქსიდები და აქროლადი ორგანული ნაერთები, როგორებიცაა ეთანი, პროპანი, ბუტანი, ეთენი, პროპენი, აცეტილენი, მეთანოლი, ფორმალდეჰიდი, აცეტალდეჰიდი და სხვ.

მზის სხივების მოქმედებით (430 ნმ-ზე ნაკლები ტალღის სიგრძის) დედამიწის ზედაპირთან ახლოს NO₂ ფოტოლიზურად იშლება აზოტის მონოოქსიდად და ატომურ ჟანგბადად. ეს ხდება ინერტულ ნაწილაკთა ზედაპირზე, რომელთა როლსაც, როგორც წესი, აზოტის მოლეკულები ასრულებს. ატომური ჟანგბადი მოლეკულურ ჟანგბადთან ურთიერთმოქმედებს და ოზონს წარმოქმნის (ნახ. 4). ჰაერის ფენებში, დედამიწის ზედაპირთან ახლოს, ოზონი კვლავ სწრაფად რეაგირებს NO-სთან და საწყის პროდუქტებს წარმოქმნის [18, 19].



ნახ. 4. აზოტის ოქსიდების ფოტოლიზური ციკლები ამგვარად იქმნება ფოტოლიზური ციკლი და მყარდება წონა-

სწორობა, რომელიც აფერხებს O_3 -ის დაგროვებას. ბევრად მოკლე სხივებს (რომელთა ტალღის სიგრძე 315 ნმ-ზე ნაკლებია) შეუძლია ოზონის მოლეკულის დაშლა ჟანგბადის სინგლეტური ატომის წარმოქმნით, რომელიც წყლის მოლეკულებთან წარმოქმნის $HO\cdot$ რადიკალებს (ნახ. 4). შემდეგი გარდაქმნები მიმდინარეობს ნახშირბადის მონოოქსიდის მონაწილეობით, რომელიც ჰიდროქსილის რადიკალებთან მოქმედებისას წარმოქმნის CO_2 -ს და წყალბადატომის რადიკალს ($H\cdot$). ეს უკანასკნელი ინერტული ნაწილაკების საშუალებით უერთდება მოლეკულურ ჟანგბადს და წარმოქმნის პეროქსიდულ რადიკალებს, რომლებიც ხელს უწყობს NO -ს დაჟანგვას NO_2 -ად. ამგვარად, ფოტოლიზური ციკლი, რომელიც ინარჩუნებს ოზონის სტაბილურ კონცენტრაციას ჰაერში, ირღვევა და იწყება ოზონის დაგროვება. მაშასადამე, ყველა რეაქცია, რომელიც ხელს უწყობს NO -ს კონცენტრაციის შემცირებას და/ან NO_2 -ის გაზრდას, ანალოგიურ შედეგს იძლევა.

1.4.4. მტვერი

ჰაერის მყარ გამაბინძურებელ კომპონენტთა ყველაზე უფრო გავრცელებულ სახეობას წარმოადგენს მტვერი, რომელსაც ყოფენ ორგანულად და არაორგანულად (მინერალურად):

- ორგანულ მტვერს მიეკუთვნება მცენარეული და ცხოველური მტვერი, ასევე ზოგიერთი ბუნებრივი და სინთეზური ნივთიერება (მაგალითად, მერქნის, პლასტმასების, ქსოვილების, ბამბის, პოლიეთერული ფისების მტვერი);
- არაორგანულ მტვერს მიეკუთვნება მეტალური და მინერალური მტვერი (მაგალითად, რკინის, ტყვიის და სხვა მძიმე მეტალების, რკინის ოქსიდის, ქვიშის, ღორღის, თაბაშირის, ცემენტის, კერამიკის მტვერი, აფეთქების შედეგად გამოყოფილი მტვერი).

მტვრის თვისებები ფართო დიაპაზონში იცვლება და დამოკიდებულია მტვრის ნაწილაკთა ზომებზე, წარმოქმნის პირობების თავისებურებებსა და მთელ რიგ სხვა პარამეტრებზე. მტვრის ძირითადი მახასიათებლებია: დისპერსიულობა (მტვრის ნაწი-

ლაკთა ზომები და მათი ფორმა), სტრუქტურა, კუთრი ზედაპირი, ადსორბციის უნარი, ქიმიური შედგენილობა, სიმკვრივე (ჭეშმარიტი, მოჩვენებითი და მოცულობითი), კუთრი ელექტრული წინაღობა, წებოვნება, აბრაზიულობა, წონასწორული სინესტე და სხვა თვისებები, რომლებიც განსაზღვრავს ზემოქმედების ხასიათს.

ადამიანისთვის განსაკუთრებულ საშიშროებას წარმოადგენს 2,5 მკმ და PM მკმ ზომების მქონე მტვრის ნაწილაკები. ასეთი ნაწილაკების შემცველი მტვრის პირობებში ადამიანის ორგანიზმზე უარყოფითი ზემოქმედება ვლინდება სასუნთქ ორგანოებში, საჭმლის მომნელებელ ტრაქტში, კანის საფარსა და ლორწოვან გარსში გამოწვეული პრობლემებით. მოქმედების ხასიათის მიხედვით მტვერს ყოფენ გამაღიზიანებელ და ტოქსიკურ სახეობებად. ქიმიურ შედგენილობაზე დამოკიდებულების მიხედვით, სამუშაო ზონის ჰაერში მისი ზღვ 1-დან 10 მგ/მ³-მდე უნდა მერყეობდეს.

1.4.5. ჰაერის გაბინძურება ნახშირწყალბადებით

ატმოსფერული ჰაერის გაბინძურებაში მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ნავთობპროდუქტები - ნახშირწყალბადთა რთული ნარევები. ნავთობის შედგენილობის ძირითადი ელემენტებია: ნახშირბადი (83-87%) და წყალბადი (12-14%). სხვა ელემენტებიდან ნავთობპროდუქტებში განსაზღვრული რაოდენობით შედის გოგირდი, აზოტი და ქანგბადი. ნავთობის შედგენილობაში შედის: ალკანები (პარაფინები), არომატული ნახშირწყალბადები, ასფალტენები, ფისები და ოლეფინები. გარდა ამისა, ნავთობი, როგორც წესი, შეიცავს მიკროელემენტებს მცირე რაოდენობით.

ნავთობი, როგორც არაგანახლებადი სუბსტანცია, ხასიათდება მსუბუქ ფრაქციებში პარაფინის და გოგირდის შემცველობით. მსუბუქ ფრაქციებს ახასიათებს მომატებული ტოქსიკურობა ცოცხალ ორგანიზმებისთვის, მათი დაბალტემპერატურულ პირობებში აორთქლების უნარი ხელს უწყობს სწრაფ თვითწმენდას. მაგალითად, პარაფინის ორთქლი ჰაერში არ ახდენს ძლიერ ტოქსიკურ მოქმედებას ცოცხალ ორგანიზმებზე, მაგრამ მაღალი

ტემპერატურის გამო გამყარებისას პარაფინი არსებით გავლენას ახდენს ნიადაგის ფიზიკურ თვისებებზე. ნავთობში არსებული გოგირდი ზრდის ნიადაგების გოგირდწყალბადით გაბინძურების საშიშროებას.

განსაკუთრებულ ჯგუფად მიზანშეწონილია გამოიყოს უფერო, დამახასიათებელი სუნის მქონე ნახშირწყალბადები, მათი მოლეკულური მასა მერყეობს 16,04-დან 44,09-მდე. ამ ნახშირწყალბადების სიმკვრივე 0°C ტემპერატურასა და 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევაზე შეადგენს 0,7168-იდან 2,019 კგ/მ³-დე, დუდილის ტემპერატურა -162°C -იდან -42°C -მდე დიაპაზონშია, კრიტიკული ტემპერატურა - -82°C -დან $+96,8^{\circ}\text{C}$ -მდე, კრიტიკული წნევა კი 4,12-იდან 4,49 მპა-მდე.

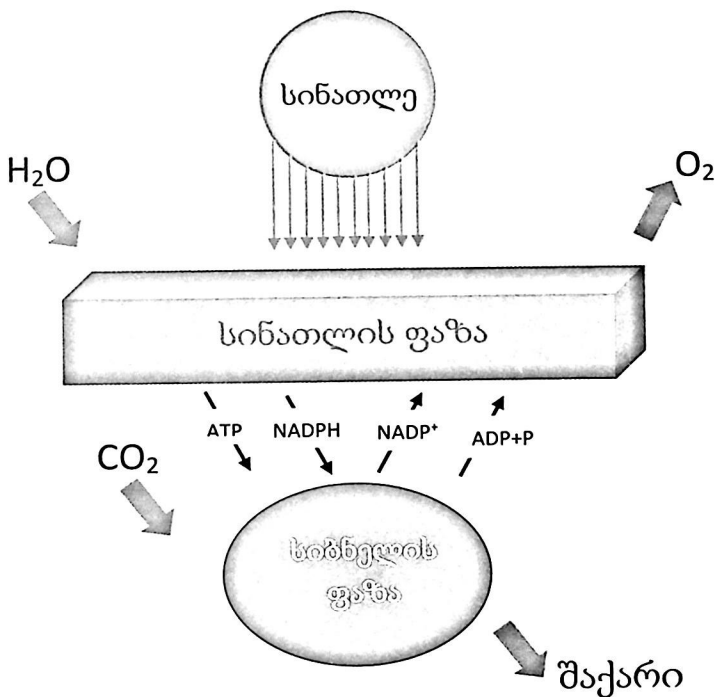
ნახშირწყალბადების ზემოქმედებით ადამიანის ორგანიზმში ზიანდება ცენტრალური ნერვული სისტემა, ენდოკრინული აპარატი, გულ-სისხლძარღვთა სისტემა, სისხლში მცირდება ჰემოგლობინის და ერითროციტების შემცველობა. სამრეწველო შენობებში სამუშაო ზონის ჰაერში ნახშირწყალბადების შემცველობა უნდა შეადგენდეს არა უმეტეს 300 მგ/მ³-ს, ქალაქის ატმოსფერულ ჰაერში ზდკ-ს ერთჯერადი მაქსიმალური კონცენტრაციაა 900 მგ/მ³, ხოლო საშუალო დღელამური ზდკ - 300 მგ/მ³.

ჰაერიდან ორგანიზმში მოხვედრილი ნივთიერებების ტოქსიკურობის ხარისხი დამოკიდებულია ნივთიერების რაოდენობაზე (დოზაზე), კონტაქტის ხანგრძლივობაზე, მისი შეღწევის გზებზე, გავრცელებასა და ორგანიზმიდან გამოსვლის სიჩქარეზე, ნივთიერების ფიზიკურ თვისებებზე, უჯრედულ სტრუქტურებთან ურთიერთმოქმედებაზე, ადამიანის სქესსა და ასაკზე, ტოქსიკანტის მიმართ მის ინდივიდუალურ მგრძობილობაზე.

1.4.6. ფოტოსინთეზის ეკოლოგიური მნიშვნელობა

ხმელეთის ორგანიზმებზე დიდი რაოდენობით ტოქსიკურ ნივთიერებათა პათოლოგიური მოქმედების თავიდან ასაცილებლად ბუნება თავად ფლობს ბუნებრივ ტექნოლოგიებს, რომელთა შორის უმნიშვნელოვანესია მიკროოგანიზმებისა და მცენარეების დეტოქსიკაციური პოტენციალი. მნიშვნელოვანია ტოქსიკანტების სტრუქტურაზე კლიმატური და ტემპერატურული ფაქტორების (ნალექები, ტემპერატურის ცვლილებები, სეზონები) ზეგავლენა, ჟანგვითი პროცესები ჰაერის ჟანგბადის მოქმედებით. სპეციფიკურ ეკოლოგიურ პროცესებს შეიძლება მივაკუთვნოთ ფოტოსინთეზის პროცესიც, რომლის დროსაც ხორციელდება ნახშირორჟანგის კოლოსალური რაოდენობის უტილიზაცია. ფოტოსინთეზი (მცენარე + მზის ენერგია + ნახშირორჟანგი + წყალი → ორგანული ნივთიერება + ჟანგბადი) ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ბუნებრივი პროცესია, რომელსაც ანალოგი არ გააჩნია და რომელიც ჩვენს პლანეტაზე სიცოცხლის არსებობას უზრუნველყოფს [20]. ფოტოსინთეზი პროცესია, რომელშიც მონაწილეობს მცენარეები და ზოგიერთი სხვა ქლოროფილშემცველი ორგანიზმები, სხივური ენერგიის ქიმიურ ენერგიად გარდასაქმნელად. ფოტოსინთეზის საშუალებით მწვანე მცენარეები, წყალმცენარეები და ბაქტერიების გარკვეული ფორმები იყენებენ მზის სხივისგან ქლოროფილის მიერ შთანთქმულ ენერგიას და ნახშირორჟანგისა და წყლისგან ქლოროფილის თანაობისას ასინთეზებენ ნახშირწყლებს და გამოყოფენ ჟანგბადს (ნახ. 5).

ქლოროფილზე დაცემული სხივის კვანტური ენერგიით გენერირდება ატფ (უჯრედის მიერ გამოყენებული ენერგიის ძირითადი ფორმა) და ხდება წყლის ფოტოდაშლა (სინათლის ფაზა). წარმოქმნილი წყალბადი მონაწილეობს ნადფ-ის ნადფ-H-ად აღდგენაში, რომლის საშუალებით ნახშირორჟანგი გლუკოზამდე აღდგება (სიბნელის ფაზა). ამ რეაქციებში ენერგიის წყაროა ატფ. წყლის ფოტოდაშლით წარმოქმნილი ჟანგბადი გარემოში გამოიყოფა. ნახ. 6-ზე ნაჩვენებია ფოტოსინთეზის პროცესის გავრცელება მთელი პლანეტის მასშტაბით.

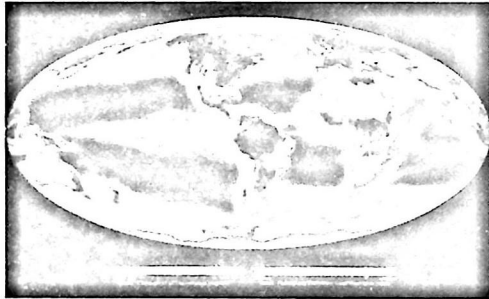


ნახ. 5. ფოტოსინთეზის პროცესი

მცენარეები, რომლებიც ნახშირორჟანგს შთანთქავენ და ორგანულ ნივთიერებად გადაამუშავენ, მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს პლანეტის ეკოლოგიურ ბალანს და, შესაბამისად, ცოცხალი ორგანიზმების არსებობისთვის აუცილებელ პირობებს ქმნის. ფოტოსინთეზის ძირითადი სუბსტრატი, ნახშირბადის დიოქსიდი (CO₂), ნახშირბადის ოქსიდთან (CO) შედარებით, წარმოიქმნება ბევრად დიდი რაოდენობით და, როგორც არაორგანული გამაბინძურებელი ნივთიერება, გარემოსთვის ნაკლებ საშიშროებას წარმოადგენს. ინტენსიური ინდუსტრიალიზაციის შედეგად გარე-

მოში ნახშირბადის დიოქსიდის რაოდენობა მუდმივად იზრდება და ისეთ მასშტაბებს აღწევს, რომ ჩნდება მის ფოტოსინთეზური გარდაქმნის პოტენციალთან დაკავშირებული პრობლემები.

ნახ. 6-ზე მუქად აღნიშნულია პლანეტის ის რეგიონები, სადაც ფოტოსინთეზი აქტიურად მიმდინარეობს. ეს მონაცემები ერთმნიშვნელოვნად მიუთითებს, რომ პლანეტაზე ფოტოსინთეზის პროცესის შესაძლო გაძლიერებისთვის მისი პოტენციალი სრულად გამოყენებული არ არის.



ნახ. 6. ფოტოსინთეზის გლობალური განაწილების რუკა, ოკეანის ფიტოპლანქტინის და ხმელეთის მცენარეულობის ჩათვლით [21].

ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურებით გამოწვეული ზემოთ ჩამოთვლილი პრობლემები, რა თქმა უნდა, არ არის ამომწურავი, მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ პლანეტის სხვადასხვა რეგიონში გავრცელებული დამაბინძურებლები საკმაოდ მრავალგვაროვანია თავისი სტრუქტურის, ფუნქციის, სტაბილურობისა და ტოქსიკურობის ხარისხის მიხედვით. ისევე როგორც ეკოსისტემის დანარჩენი კომპონენტები, ატმოსფერული ჰაერი წარმოადგენს ეკოსისტემის საკმაოდ მგრძნობიარე შემადგენელ ნაწილს და მისი ეკოლოგია განსაკუთრებულ ყურადღებას მოითხოვს.

როგორც ატმოსფერული, ისე შენობაში არსებული ჰაერის გასაწმენდად მუშავდება მთელი რიგი ინოვაციური ტექნოლოგიები.

ასე მაგალითად, ფირმა „აიროსადმა“ სპეციალურად “NASA“-სთვის დაამუშავა შენობაში არსებული ჰაერის გაწმენდის ტექნოლოგია ოზონის საშუალებით, რომელიც ითვალისწინებს ჰაერში ეთილენის შემცველობის რეგულირების საშუალებას, რომელიც წარმოიქმნება დახურულ შენობებში დიდი რაოდენობის მარცვლეულის მოყვანისა და შენახვის შედეგად [22].

1.5. ნიადაგი

ნიადაგი კაცობრიობის შეუფასებელი ბუნებრივი სიმდიდრეა, ყველა სახის ორგანიზმთა არსებობის ფუნდამენტია. ნიადაგი ორგანიზმების (ბაქტერიები, სოკოები, წყალმცენარეები, ცხოველები, მცენარეები და სხვ.) ბინადრობისა და გამრავლების ხელსაყრელი გარემოა. ნიადაგში მყოფი ორგანიზმები, მათ მიერ განხორციელებული ნივთიერებათა ცვლის გამო, უზრუნველყოფს ნიადაგის ნაყოფიერებას. მაგალითად, ბაქტერიები, სოკოები და აქტინობაქტერიები ორგანულ ნივთიერებებს შლიან არაორგანულ ნივთიერებად, რომლებიც იხსნება წყალში და ნიადაგის ხსნარის სახით შეიწოვება მცენარეთა ფესვებით. ნიადაგი და მცენარეები მუდმივ ურთიერთქმედებაშია, რის გარეშეც წარმოუდგენელია ამ უკანასკნელთა არსებობა. ნიადაგი მცენარისთვის უმნიშვნელოვანესი სასიცოცხლო გარემო და არსებობის საფუძველია. მცენარე ნიადაგიდან იღებს წყალს, აზოტს, ფოსფორს და ყველა სხვა შემადგენელ ელემენტს.

ნიადაგის შემადგენელი კომპონენტებით მცენარის კვება განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია. ჰაერიდან მცენარე ითვისებს მხოლოდ ჟანგბადს და ნახშირორჟანგს, ხოლო ყველა სხვა ორგანული და მინერალურ ნივთიერებას ნიადაგიდან იღებს. საკვებ ნივთიერებათა ამ კომპლექსის გარეშე მცენარეს ფუნქციონირება არ შეუძლია.

განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს ქიმიურ/ბიოლოგიური ურთიერთობა ნიადაგს და მცენარეს შორის, რაც მცენარეთა მიერ გამოყოფილი ექსუდატებით ნიადაგის გამდიდრებაში მდგომარეობს. ეს ნივთიერებები ხელს უწყობს ნიადაგის მიკროფლორის გამრავლებასა და გააქტიურებას. ნიადაგი, თავის მხრივ, ამზადებს

ორგანულ და არაორგანულ ნაერთებს მცენარეების მიერ სრულფა-
სოვნად ასათვისებლად.

მცენარეები ნიადაგის აზოტოვან არაორგანულ ნაერთებს იყე-
ნებს აზოტის შემცველ მრავალფეროვან ორგანულ ნივთიერებათა
სინთეზისთვის, რომლებიც აუცილებელია მცენარეთა ზრდისა და
ნაყოფიერებისთვის. ყოველივე ეს მცენარეული უჯრედის მრავალ-
მხრივი მოღვაწეობის მაგალითია. მცენარეებისთვის განსაკუთრე-
ბულად დამახასიათებელია, დიდი რაოდენობით ისეთი მნიშვნე-
ლოვანი და უნიკალური კომპონენტების სინთეზი, როგორებიცაა
დაბალმოლეკულური ნაერთები - ე.წ. მეორეული მეტაბოლიტები
(ფენოლური ნაერთები, ეთერზეთები, ნახშირწყლები, ამინმჟა-
ვები და სხვ.). მეორეულ მეტაბოლიტებს მიეკუთვნება ასევე მცე-
ნარეული ტოქსინები, სხვა ორგანული ნივთიერებები, რომლებიც
უშუალოდ არ მონაწილეობს ორგანიზმის ზრდაში, განვითარებასა
და გამრავლებაში. მიუხედავად ამისა, მეორეული მეტაბოლიტები
მცენარეში გარკვეულ ფიზიოლოგიურ ფუნქციებსაც ასრულებს,
მაგალითად, იცავს მცენარეს ფიტოპათოგენური მიკროორგანი-
ზმებისგან, მწერებისგან, ცხოველებისგან. მცენარეთა ამ კარგად
ცნობილ და მნიშვნელოვან თვისებებს დაემატა ახალი მახასიათე-
ბელი, რომლის თანახმადაც მცენარეებს და ნიადაგის მიკროორგა-
ნიზმებს, როგორც ეკოლოგიურ აგენტებს, ნიადაგში ტოქსიკური
ბუნების მქონე უცხო ნივთიერებათა მეტაბოლური გარდაქმნის
უნარი ახასიათებთ.

მცენარეებისა და ნიადაგის მიკროორგანიზმების ზემოთ აღნიშ-
ნული უნარი ჟანგვა-აღდგენითი და ჰიდროლიზური ფერმენტული
სისტემების მაღალ აქტიურობაში მდგომარეობს, რის ხარჯზეც
ნიადაგიდან ტოქსიკური ბუნების გამაბინძურებლების მოცილება
ხდება. მცენარისთვის დამახასიათებელი ბიოდეგრადაციის ეს გზა,
უდავოდ, პერსპექტიულია, რადგან სრულიად ბუნებრივია და არ
საჭიროებს კრიტიკულ ფიზიკურ პირობებს ან ეკოლოგიურად მა-
ვნე ქიმიური ნივთიერებების გამოყენებას [23].

ნიადაგის გასამდიდრებლად ზოგიერთ მცენარეთა (პარკოსნე-
ბი) უმნიშვნელოვანესი უნარია მათი სიმბიოზი რიზობიუმის სახე-
ობის ნიადაგის ბაქტერიებთან, რომელთაც მოლეკულური აზოტის
ფიქსაციის უნარი შესწევთ.

დედამიწის ატმოსფერო 78,03% აზოტისგან (N_2) შედგება, მაგრამ იგი ქიმიურად იმდენად ინერტულია, რომ მისი შებოჭვა და ორგანულ ნაერთებად გადაყვანის უნარი მხოლოდ აზოტმაფიქსირებელ სიმბიოზურ ბაქტერიებს შესწევთ. ჩვეულებრივ, ბაქტერიებს, პარკოსან მცენარეებთან სიმბიოზში, შეუძლიათ 100-300 კგ მოლეკულური აზოტის ფიქსაცია ნათესი ფართობის ერთ ჰექტარზე, მაშინ როცა თავისუფლად მცხოვრები აზოტფიქსატორები იმავე ფართობზე მხოლოდ 1-3 კგ აზოტს ითვისებენ.

ნიადაგში არსებული მცენარეთა არაჩვეულებრივად დიდი საყარო (Planta), მიეკუთვნება ეუკარიოტების სამეფოს. პროკარიოტებს შორის ასევე არის მთელი რიგი ავტოტროფული ორგანიზმები, რომელთაც შეუძლიათ მზის ენერჯის გამოყენება. ესენია როდოსპირილები და ლურჯ-მწვანე წყალმცენარეები ანუ ციანობაქტერიები. ციანობაქტერიებში ფოტოსინთეზი ეუკარიოტ-მცენარეთა მსგავსად, ჟანგბადის გამოყოფით მიმდინარეობს.

დადგენილია, რომ ნიადაგში მიმდინარე პროცესები მჭიდროდ არის დაკავშირებული ეკოლოგიასთან, კერძოდ, ნიადაგის მიკროფლორა მცენარეებთან ერთად სიმბიოზურად ახორციელებს ბუნებისთვის უცხო, მათ შორის, ტოქსიკური ბუნების ნივთიერებების დეტოქსიკაციას (გაუვნებელყოფას) [24, 25].

პლანეტის სხვადასხვა რეგიონში აგრარული, დეკორაციული, სპორტული და სხვა მიზნებისთვის ნიადაგის სასარგებლო სისქე 25-დან 150 სმ-მდე მერყეობს. ამ ზღვრებში მდებარე ნიადაგის ფენა გარს არტყია დედამიწის უდიდეს ნაწილს და მზის ენერჯიასთან და ნალექებთან ერთად ყველა სახის ორგანიზმებს არსებობის საფუძველს წარმოადგენს. ნიადაგის ეკოლოგიური მდგომარეობის დიდ მნიშვნელობაზე მეტყველებს ის ფაქტიც, რომ ჯანსაღ ადამიანთა თაობის არსებობა შესაძლებელია მხოლოდ ჯანსაღი ნიადაგის პირობებში. ნიადაგი, რომელშიც მიმდინარეობს მოზინადრე ორგანიზმების მუდმივი ნივთიერებათა ცვლა და მათი დიფუზია, წარმოადგენს ურთულეს ბუნებრივ სისტემას. მისი მინიმალური შემადგენელი კომპონენტებია მინერალური და ორგანული ნივთიერებები, წყალი, ჰაერი და მიკროორგანიზმები, როგორც აუცილებელი ფაქტორი, რომელიც განაპირობებს ნიადაგის მრავალფეროვან ფუნქციურ აქტიურობას. ნიადაგში მუდმივად მიმდინარე

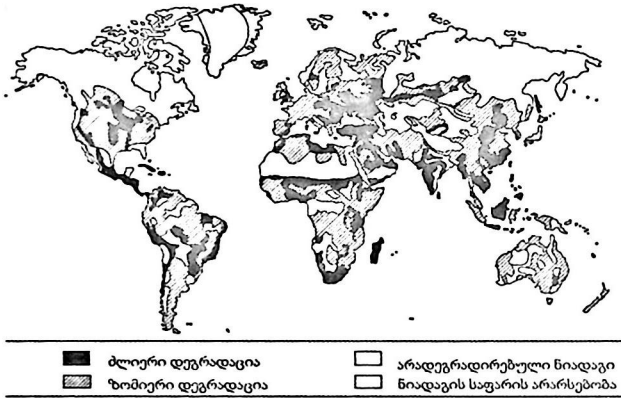
ბიოლოგიური, ქიმიური და ფოტოქიმიური პროცესების შედეგად მიმდინარეობს ნიადაგის თვითგანახლება, უცხო არაორგანულ და ორგანულ ნივთიერებათა დეგრადაცია და არსებული, ნიადაგურ-კლიმატური პირობებისთვის დამახასიათებელი ნივთიერებების სინთეზი. ამით ნიადაგი ინარჩუნებს მისთვის ჩვეულ ნაყოფიერებას. სრულფასოვანი ნიადაგის თვითფორმირებას ხანგრძლივი დრო სჭირდება (დაახლოებით რვა-ათი წელი), ნიადაგურ-კლიმატური პირობების მიხედვით. ფუნქციურად აქტიურ ნიადაგში (რომელშიც აქტიურად მიმდინარეობს ბუნებრივი პროცესები) ნიადაგის სასარგებლო მიკროფლორა შედარებით იშვიათად შეიცავს პათოგენურ ორგანიზმებს (ბაქტერიებს, ვირუსებს, პათოგენურ სოკოებს). ნიადაგის ერთ-ერთი შესანიშნავი თვისებაა მისი თვითგაწმენდის უნარი, რის წყალობითაც ხდება მისი ადაპტაცია გარემოს პირობებთან. ანსხვავებენ ნიადაგის შემდეგ სახეებს: რუხი, მურა, წაბლა, შავმიწა, წითელმიწა, რუხი-ყავისფერი, ტყის ყომრალი, მთა-დელოს კორდიანი და სხვ.

განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, რომ ჯანსაღი ნიადაგი, როგორც ბუნების ერთ-ერთი ძირითადი კომპონენტი, და როგორც მნიშვნელოვანი ბიოლოგიური ფაქტორი, გარემოს სხვა კომპონენტებთან ერთად, გავლენას ახდენს რეგიონის მიკროკლიმატზე. ეს უნარი განპირობებულია მცენარეების, ნიადაგის მიკროფლორის და სხვა ორგანიზმების მრავალფეროვნებით, რაც განაპირობებს ნიადაგის „იმუნური“ სისტემის მაღალ დონეს. მაშასადამე, ძლიერი და ჯანმრთელი ნიადაგი თრგუნავს ყველა უცხო და, მათ შორის, პათოგენური მიკროფლორის (ბაქტერიები, ვირუსები, სოკოები) გავრცელებას [26]. სრულიად სამართლიანად უნდა აღინიშნოს, რომ ჯანსაღი და ნორმალურად მოქმედი ნიადაგი წარმოადგენს მთელი ბუნების „იმუნური“ სისტემის მნიშვნელოვან შემადგენელ ელემენტს. გაეროს სურსათის და სასოფლო-სამეურნეო ორგანიზაციის (Food and Agricultural Organization) მონაცემებით ნიადაგი ყოველწლიურად გვაძლევს 760 მილიონ ტონაზე მეტ ხორბალს, 510 მილიონ ტონა ბრინჯს, 1100 ტონა სიმინდს, 350 მილიონ ტონა კარტოფილს, 175 მილიონ შაქარს, 335 მილიონ ტონა ხორცს, 852 მილიონ ტონა რძეს და დიდი რაოდენობის სხვა აგრარულ პროდუქციას.

აღიარებულია, რომ ნიადაგის ეკოლოგიური მდგომარეობა ბოლო 100 წლის განმავლობაში გაუარესდა. ეს მონაცემები ციფრებში შემდეგნაირად გამოისახება: დღეს პლანეტის ხმელეთის დაახლოებით 40% დაფარულია მცენარეულობით, ყოველწლიურად ეროზიას განიცდის 2 მილიარდამდე ჰექტარი, ხოლო გაუდაბნობას - 4,5 მილიარდი ჰექტარი, ტყით დაფარული ფართობი საშუალოდ, 10 მილიონი ჰექტრით მცირდება. თანამედროვე პირობებში პლანეტის მოსახლეობის ერთ სულზე მოდის ნიადაგის 0,4 ჰექტარი და ეს მაჩვენებელი მუდმივად მცირდება. ადგილი აქვს მიწების სისტემატურად მზარდ ექსპლუატაციას და მიწათმოქმედებისთვის ვარგისი სავარგულების შემცირებას. პროგნოზის თანახმად, 3 ათეული წლის შემდეგ მიწების რაოდენობა აგრარული მიზნებისთვის მოსახლეობის ერთ სულზე შემცირდება 0,1 ჰექტრამდე, რაც წარმოადგენს ფართობის კრიტიკულ რაოდენობას და ეკოლოგიური და სასურსათო კატასტროფის დასაწყისს.

ნიადაგი უაღრესად რთული, ცვალებადი და ცოცხალი გარემოა. იგი შეიცავს მსოფლიო ბიომრავალფეროვნების 25%-ს, ორჯერ მეტ ნახშირბადს, ვიდრე ატმოსფერო, იძლევა დაახლოებით 95% საკვებს, რომელიც დაკავშირებულია ნიადაგთან.

ნიადაგის, როგორც უმნიშვნელოვანესი ეკოლოგიური ნიშის გაუარესების მიზეზია გარე ფაქტორების გავლენა, რომელთა რიცხვს უნდა მივაკუთვნოთ ნიადაგში სხვადასხვა სტაბილურობისა და სტრუქტურის მქონე ტექნოგენური ტოქსიკური ნივთიერების არსებობა, რომელთა რაოდენობა უკანასკნელი 50 წლის განმავლობაში მუდმივად იზრდება: ის ფაქტი, რომ მრეწველობა და ეკოლოგიური ვითარება იმანენტურად, ურთიერთგამომრიცხავი ფაქტორებია, ეჭვს არ იწვევს. ამიტომ განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს ახალ, ბუნებისთვის უსაფრთხო ტექნოლოგიებს. ეს აუცილებელია რეგიონული ეკოლოგიური ბალანსის შესანარჩუნებლად. ამ მიზნით მთელ რიგ განვითარებულ ქვეყნებს მრეწველობის ეკოლოგიურად მავნე წარმოებები განვითარებად ქვეყნებში გადააქვთ, რაც მხოლოდ დროებით იძლევა საშუალებას, ამ ქვეყნებში შენარჩუნებულ იქნას ეკოლოგიური თანასწორობა. ნახ.7-ზე წარმოდგენილია პლანეტის არცთუ სახარბიელო ნიადაგების ეკოლოგიური მდგომარეობა.



ნახ. 7. პლანეტის ყველა ნიადაგის ეკოლოგიური მდგომარეობა [32].

მხედველობაში თუ მივიღებთ გარემოში ტოქსიკურ ნივთიერებათა ინტენსიურ ემისიას და ამ ნაერთთა მაღალ სტაბილურობას აბიოტური პირობებისადმი, გარდაუვალია ნიადაგის ზედა ფენის დეგრადაცია და ეროზიის თანმხლები პროცესები: დამლაშება, გაუდაბნობა, დაჭაობება. ამ პროცესების მიზეზებია ენერგეტიკული კომპლექსების, ქიმიური, მეტალურგიული, ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნების ტოქსიკური გამონაბოლქვები და ნარჩენები, ავტომანქანების და ტრანსპორტის მიერ წარმოქმნილი ტოქსიკური ნაერთები, სოფლის მეურნეობაში გამოყენებული სხვადასხვა ნაერთები და ა.შ. მთელ რიგ ქვეყნებში მრეწველობაში რეალიზებული ახალი ტექნოლოგიების დიდი რაოდენობა მნიშვნელოვნად ზრდის ტექნოგენური გაბინძურების ფაქტორს, რაც საგანგაშო ტემპით ძლიერდება და საშიშ მასშტაბებს აღწევს.

დედამიწაზე დიდი ხანია გამოვლენილია ისეთი რეგიონები, სადაც ზოგიერთი ტოქსიკური ნივთიერებით ნიადაგის გაბინძურების დონე ბევრად აღემატება ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციას. მძიმე ეკოლოგიურ სიტუაციაშია საუდის არაბეთი, კუვეიტი, კატარი, ემირატები, ომანი, ლიბია. ყველა ეს სახელმწიფო ნავთობის და ბუნებრივი აირის მომპოვებელ ქვეყნებს წარმოადგენს.

ნიადაგის დამაბინძურებელ მაღალტოქსიკურ ნივთიერებებს, დანიშნულების მიხედვით, შემდეგ ჯგუფებად ყოფენ: პესტიციდები (სოფლის მეურნეობა), ნავთობპროდუქტები (ქიმიური და ნავთობქიმიური მრეწველობა), პოლიმერული მასალები (ქიმიური მრეწველობა და სამშენებლო ინდუსტრია), სარეცხი საშუალებანი (ავტოსერვისი და საყოფაცხოვრებო სფერო), ფეთქებადი ნივთიერებები (სამხედრო-სამრეწველო კომპლექსი, სამთო-მომპოვებელი მრეწველობა, პიროტექნიკა).

1.5.1. ნიადაგის გაბინძურება სამხედრო მოქმედებებით

გარემოს და ნიადაგს მნიშვნელოვან ზიანს აყენებს ომები, რომლებიც მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყანაში პერმანენტულად მიმდინარეობს. ომებისთვის დამახასიათებელი ხილული მსხვერპლის და ნგრევის გარდა, საომარი მოქმედებების პირობებში გარემოს ყველა კომპონენტი, ნიადაგის ჩათვლით, მნიშვნელოვნად ბინძურდება კანცეროგენური, ფეთქებადი ნივთიერებებით, აგრესიული ხსნარებით და სხვა ტოქსიკური ნაერთებით, მათ შორის ქიმიური და ბიოლოგიური იარაღის კომპონენტებით. კანცეროგენური ბუნების ტოქსიკური ფეთქებადი ნივთიერებები, რომელთა კლასიკური წარმომადგენელია 2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (ტროტილი, ტნტ), წარმოადგენს მსოფლიოს ყველა ქვეყნის სამხედრო შეიარაღების უნივერსალურ კომპონენტს. ეს ნივთიერება, რომელიც ქიმიური სინთეზით მიიღება, შეიცავს სამ ნიტროჯგუფს და ბიოტური და აბიოტური ზემოქმედებების მიმართ მაღალ მდგრადობას ავლენს. ნიადაგში მოხვედრისას ტნტ წლობით ინარჩუნებს თავის უკიდურეს ტოქსიკურობას, რითაც დიდ ზიანს აყენებს ნიადაგის მიკროფლორას. ნიადაგში მზარდ ერთწლიან და მრავალწლიან მცენარეებს არ შეუძლია ტნტ-ს სწრაფი და სრული დეტოქსიკაცია, რისთვისაც დეგრადაციის საწყის ეტაპზე აუცილებელია ნიტროჯგუფების აღდგენა. მაღალი ტოქსიკურობა ახასიათებს ასევე ტნტ-ს ნაწილობრივი გარდაქმნის შუალედურ პროდუქტებსაც.

ამ კონტექსტში არ შეიძლება არ ვახსენოთ ქიმიური იარაღიც, რომელიც მიღებულია ქიმიური სინთეზით და შედგება აქტიური ქიმიური მზამებისგან და სხვა ბიოლოგიურად აგრესიული კომპო-

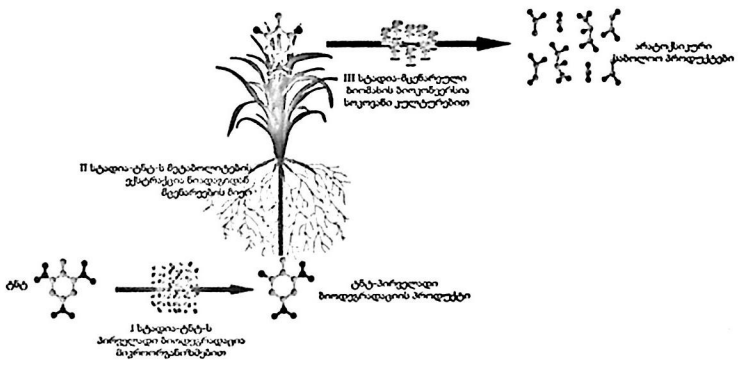
ნენტებისგან, რაც მნიშვნელოვნად ართულებს ნიადაგში მათ ბიოლოგიურ გაუვნებლობას ბუნებრივ პირობებში, მიკროორგანიზმების და მცენარეების ფერმენტული სისტემებით.

გარემოს ყველა შემადგენელი კომპონენტი (ტბები, ტბორები, მიწისქვეშა წყლები) საომარ მდგომარეობაში მყოფ ან ომის შემდგომ ქვეყნებში ნიადაგში დიდი რაოდენობის ტოქსიკურ ნივთიერებათა რაოდენობის დაგროვებით ხასიათდება. ასევე აღსანიშნავია მათი ბიოტრანსფორმაციის შუალედური ტოქსიკური პროდუქტების არსებობა. ამიტომ ნაომარი ქვეყნის ყველა ეკოლოგიური ნიშა სერიოზულ ეკოლოგიურ კონტროლს და რემედიაციულ ღონისძიებათა გატარებას მოითხოვს [28].

მაგალითისთვის მოგვყავს ტნტ-ს შემცველი ნიადაგების რემედიაციის სქემა. ტექნოლოგია დამუშავებულია პროფესორ გია ხატისაშვილის მიერ. აღნიშნული ბიოტექნოლოგია მდგომარეობს ტნტ-თი დაბინძურებული ნიადაგების ფიტორემედიაციის კომბინირებულ მიდგომაში. ამ ინოვაციური ბიოტექნოლოგიის არსი წარმოადგენს ნიადაგის ბიოლოგიური დამუშავების სამსაფეხურიან ტექნოლოგიას შემდეგი თანმიმდევრობით (ნახ. 8) [29]:

- პირველ სტადიაზე („რიზოდეგრადაცია“) ნიადაგში შეაქვთ ამ მიზნებისთვის სპეციალურად სელექციურად შერჩეული რიზოსფერული მიკროორგანიზმები, რომლებიც ფესვებთან ახლო სისტემაში ახორციელებენ ფეთქებად ნივთიერებათა საწყის ტრანსფორმაციას, გარდაქმნიან რა მათ შედარებით ნაკლებად ტოქსიკურ, უფრო მეტად ჰიდროფილურ ნივთიერებად, რომელთა შეთვისება გაცილებით იოლად ხდება მცენარეების მიერ;
- მეორე სტადიაზე („ექსტრაქცია“) ამ მიზნისთვის სპეციალურად შერჩეული მაღალი ფიტორემედიაციული პოტენციალის მქონე მცენარეები ეფექტიანად აცილებს ნიადაგს ფეთქებად ნივთიერებათა ნაწილობრივად გარდაქმნილ პროდუქტებს და, საბოლოო ჯამში, მათ უპირატესად მცენარეთა ზედა ნაწილებში აგროვებს;
- მესამე სტადიაზე („ბიოკონვერსია“) ფიტორემედიაციაში გამოყენებულ მცენარეთა ნარჩენებს ამუშავებენ ბაზიდიალური სოკოებით, რომლებიც მცენარეულ ბიომასაში

მთლიანად შლის ფეთქებად ნივთიერებათა ტოქსიკურ ნარჩენთა ნახშირბადოვან ჩონჩხს, რითაც მიიღწევა ტნტ-ს და მისი ნაწილობრივი დეგრადაციის პროდუქტების გაუვნებლების მაქსიმალური ხარისხი, არატოქსიკურ მეტაბოლიტებად ბიოლოგიური ტრანსფორმაციის გზით.



ნახ. 8. ტნტ-ით გაბინძურებული ნიადაგების რემედიაციის სამსაფეხურიანი ბიოტექნოლოგიის სქემა.

გარემოს ანთროპოგენური გაბინძურება არადამახასიათებელი აირადი, თხევადი და მყარი ნივთიერებებით რჩება მწვავე ეკოლოგიურ პრობლემად, რომელსაც პრიორიტეტული სოციალური და ეკონომიკური მნიშვნელობა აქვს.

1.5.2. ნიადაგის გაბინძურება პესტიციდებით

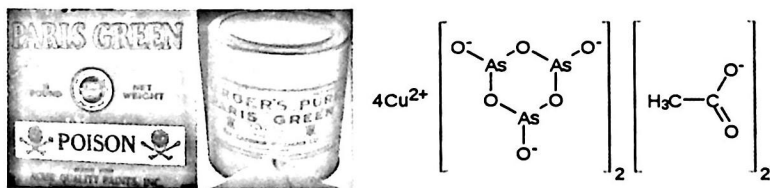
პესტიციდები წარმოადგენენ მცენარეთა ქიმიური დაცვის საშუალებებს, რომლებიც სარეველებთან, მავნე მწერებთან, ფიტოპათოგენურ სოკოებთან და მცენარეთა დაავადებებთან საბრძოლველად გამოიყენება. პესტიციდებს მიეკუთვნება ორგანულ და არაორგანულ ქიმიურ ნივთიერებათა სხვადასხვა კლასის ათასზე

მეტი წარმომადგენელი. ყოველწლიურად მსოფლიო მასშტაბით პესტიციდების წარმოება და გამოყენება აღწევს მილიარდ ტონას. მოქმედების ტიპის მიხედვით პესტიციდებს, ჩვეულებრივ, შემდეგ ჯგუფებად ყოფენ [30, 31]:

- ალგიციდები - გამოიყენება წყალმცენარეებთან საბრძოლველად;
- აკარიციდები - ტკიპების საწინააღმდეგო საშუალება;
- ატრაქტანტები - საშუალებები, რომლებიც იზიდავს პარაზიტებს, მწერებს და მღრღნელებს;
- ბაქტერიციდები, ბიოციდები, დეზინფექტანტები - იხმარება მიკროორგანიზმების გასანადგურებლად, ბაქტერიულ დაავადებებისგან დასაცავად;
- დესიკანტები - ქიმიური რეაგენტები, რომლებიც იწვევს არასასურველ მცენარეთა ფესვების გამოშრობას;
- დეფოლიანტები - იყენებენ მცენარეების ფოთოლცვენის დასაჩქარებლად.
- ინსექტიციდები - მწერების საწინააღმდეგო საშუალებანი;
- მოლუსკიციდები - გამოიყენება ლოკოკინებისგან წყალქვეშა ზედაპირების დასაცავად;
- ნემატოციდები - გამოიყენება მრგვალი ჭიებისაგან (ნემატოდები) დაცვის მიზნით;
- ოვოციდები - გამოიყენება მწერებისა და ჭიების კვერცხების გასანადგურებლად;
- რეპელენტები - ნივთიერებები, რომლებიც აფრთხობს მწერებს, ძუძუმწოვრებს, ფრინველებს;
- როდენტიციდები - მღრღნელების გასანადგურებლად;
- ფერომონები - ნივთიერებები, რომლებიც იზიდავს საწინააღმდეგო სქესის არსებებს;
- ფუმিგანტები - შენობებში და ნიადაგში მავნებლების გასანადგურებელი პრეპარატები;
- ფუნგიციდები - სოკოვანი დაავადებებისაგან დამცველი საშუალებები;
- ჰერბიციდები - გამოიყენება სარეველა და შხამიანი მცენარეულობის გასანადგურებლად.

პესტიციდების დიდი უმრავლესობა ტოქსიკური ბუნების ნივთიერებებია. ნიადაგზე ხანგრძლივი არასასურველი მოქმედების თავიდან ასაცილებლად მათ გამოყენებას უნდა ჰქონდეს შეზღუდული ვადა, რის შემდეგადაც ისინი უნდა განადგურდნენ (დაიშალონ უვნებელ კომპონენტებად). რადგან პესტიციდები ძირითად ქიმიური სინთეზით მიღებული ნივთიერებებია, მათი ბიოდეგრადაცია ნიადაგის მიკროორგანიზმების და მცენარეთა ფესვთა სისტემის ჰიდროლიზური და ჟანგვითი ფერმენტებით ყოველთვის არ არის შესაძლებელი. ბოლო დროს განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მიკრობიოლოგიური სინთეზით მიღებულ ბიოპესტიციდებს, რომლებიც წარმოადგენს ბიოდეგრადირებად ნივთიერებებს და სწრაფად იშლება ნიადაგის მიკროფლორით.

არაორგანულ პესტიციდებს შორის ყველაზე გავრცელებულია სპილენძის ნაერთები (სპილენძის შაბიამანი და სპილენძის ფუძე სულფატები, რომლებიც გამოიყენება ბორდოს ხსნარის დასამზადებლად), ფთორის ნაერთები (ნატრიუმის ფთორიდი, ნატრიუმის, კალიუმის, ამონიუმის, თუთიის, მაგნიუმის სილიციუმფთორიდები), დარიშხანის ნაერთები (ნატრიუმის და კალციუმის არსენიტები და არსენატები, სპილენძი(II)-ის აცეტატ-არსენიტი, ე.წ. „პარიზის მწვანე“ (ნახ. 9), ტყვიის ჰიდროარსენატი და სხვ.), ბარიუმის და ვერცხლისწყლის ნაერთები (ქლორიდების სახით) და სხვ. მნიშვნელოვან არაორგანულ პესტიციდებს მიეკუთვნება ასევე გოგირდი და მისი სხვადასხვა ნაერთი. მაგალითად, ელემენტარული გოგირდი წვრილად დაქუცმაცებული სახით (ე.წ. „კოლოიდური გოგირდი“) ეფექტიანად გამოიყენება ტკიპების და ნაცრის წინააღმდეგ.



ნახ. 9. „პარიზის მწვანე“ - სპილენძი(II)-ის აცეტატ-არსენიტი. ორგანული პესტიციდები, რომლებიც ქიმიური სინთეზით მიი-

ღება, ძირითადად ქლორორგანულ, ფოსფორორგანულ, მეტალორგანულ და სხვა ტიპის ნაერთებია. რიგ შემთხვევებში მათ კლასიფიკაციას ახდენენ იმ ქიმიურ ნაერთთა მიხედვით, რომელთაგანაც ისინი იწარმოებიან: შარდოვანა, ფენოქსიმჟავები, დიპირიდინილები, ალკალოიდები (პირეტრინი) და სხვ. ორგანული პესტიციდების ცალკეულ წარმომადგენლებს დეტალურად მე-2 თავში გავეცნობით.

მოქმედების ხასიათის მიხედვით, პესტიციდები შეიძლება იყოს კონტაქტური ან სისტემური. კონტაქტურია პესტიციდები, რომლებიც ფარავს მცენარის ზედაპირს და ამგვარად მცენარეს იცავს მავნებელთა მოქმედებისგან. უმრავლეს შემთხვევაში კონტაქტურ პესტიციდებს შესწევთ უნარი შეიჭრან მცენარეთა შიგაუჯრედულ სისტემაში, მათგან განსხვავებით, სისტემური პესტიციდები ინტენსიურად იჭრება შიგაუჯრედულ სისტემაში, ნაწილდება მცენარეთა მთელი სიგრძის გასწვრივ და იწვევს ლეტალურ მოქმედებას ფიტოპათოგენური მწერების და მიკროორგანიზმების წინააღმდეგ.

1.5.3. ნიადაგის გაბინძურება ნავთობით

ნიადაგში ნავთობის მოხვედრისას მიმდინარეობს მორფოლოგიური, ფიზიკური, ფიზიკურ-ქიმიური, მიკრობიოლოგიური თვისებების ღრმა, ხშირად შეუქცევადი ცვლილებები. ეს იწვევს ნიადაგის პროფილის არსებით ცვლილებებს, გაბინძურებული ნიადაგების ნაყოფიერების დაკარგვას და ტერიტორიების ჩამოშორებას სასოფლო-სამეურნეო გამოყენებისგან [32-34].

აერობულ პირობებში, ჰაერში და ჟანგბადით მდიდარი რეზერვუარების ზედაპირულ ფენებში C^{14} -ის ნახევარგამოყოფის პერიოდი 60-100 წელია, ხოლო რეზერვუარებისა და სილის ქვედა ნალებებში ნახშირბადის ტეტრაქლორიდი შეითვისება ანაერობული მიკროორგანიზმების მიერ 16 დღეში [40].

ნავთობპროდუქტები აირადი, თხევადი და მყარი ნახშირწყალბადების და ორგანულ ნაერთთა სხვა კლასების რთული ნარევია. გეოგრაფიულად განსხვავებულ ტერიტორიებზე მოპოვებულ სხვადასხვა სახის ნავთობის შედგენილობაში იდენტიფიცირებულია 1000-ზე მეტი ნაერთი. ნედლი ნავთობი შეიცავს ასობით სხვადას-

ხვა ქიმიურ კომპონენტს, რომელთა შორის 75% ნახშირწყალბადე-ბია, დანარჩენი გოგირდის, აზოტის და ქანგბადის შემცველი ნახ-შირწყალბადების წარმოებულეზია. ნავთობის ნახშირწყალბადეზია პარაფინები (10-30%), ციკლოპარაფინები ანუ ნაფტენები (30-60%), არომატული და ნაფტენ-არომატული ნახშირწყალბადეზი (5%-მდე).

ნავთობპროდუქტები, რომლებიც ნიადაგის ერთ-ერთი ძირი-თადი გამაზინძურებელია, ფართოდ გამოიყენება მრეწველოზის სხვადასხვა სფეროზში, ძირითადად, ნედლი ნავთობიდან გამო-ყოფილი სხვადასხვა ნახშირწყალბადოვანი ფრაქციეზის სახით. ნავთობის გადამუშავეზის პროდუქტეზის გამოყენეზას აქვს ფართო სპექტრი, ესენია: ბენზინი (საავიაციო და საავტომობილო), ნავთი (რეაქტიული, სატრაქტორო, სანათი), დიზელის და საქვაბე სა-წვავი; მაზუთეზი, გამხსნელები, საცხებ-საპოხი ზეთეზი, გუდრო-ნეზი, ბითუმეზი, კოქსი და სხვ.

ნიადაგის მიკროორგანიზმეზი - ბაქტერიეზი და მიცელია-ლური სოკოეზი ნავთობს მარტივ ნახშირწყალბადეზად შლიან. ნავთობის მიძიმე ფრაქციეზს ახასიათეზს მაღალი მდგრადოზა ნია-დაგის მიკროფლორის ზემოქმედეზის მიმართ, ილექეზა თითქმის უცვლელი სახით. ნავთობპროდუქტთა გარდაქმნის, მიგრაციის და აკუმულაციის პროცესეზის სიჭარბე მნიშვნელოვნად განისა-ზღვრება ბუნებრივ-კლიმატური პირობეზით და თვით ნიადაგის მახასიათებლებით. ყოველივე ეს იწვევს ნაყოფიერეზის მნიშვნე-ლოვან შემცირეზას, ზოგჯერ კი გაზინძურებული ტერიტორიეზის სრულ უვარგისოზას აგრარული მიზნეზისთვის.

მოსავლის ფორმირეზის პროცესში მცენარეს ყოველთვის არ შესწევს უნარი, მოახდინოს ნახშირწყალბადეზის სრული ჟანგვითი დეგრადაცია, რის გამოც ეს ნაერთეზი შესაძლოა აღმოჩნდეს კვების ჯაჭვში. ადამიანის ორგანიზმში ნახშირწყალბადეზის მოხვედრა იწვევს ცენტრალური ნერვული სისტემის, ენდოკრინული აპარა-ტის, გულსისხლძარღვთა სისტემის დაზიანეზას, სისხლში ჰემოგ-ლობინის და ერითროციტეზის შემცველოზის შემცირეზას.

ნახშირწყალბადეზი ნიადაგის მიკროორგანიზმეზის მოქმედე-ბით, ასევე ფოტო- და ქიმიური დაჟანგვის შედეგად მუდმივად განიცდის ჟანგვით დეგრადაციას, უნდა აღინიშნოს, რომ ჯერ-ჯე-

რობით არ არის აღმოჩენილი მიკროორგანიზმების ისეთი ტაქსონომიური სახეობა, რომლის ინდივიდუალური წარმომადგენელი შეძლებდა ნავთობის ყველა კომპონენტის ასიმილირებას. მიკროორგანიზმები იოლად და სწრაფად ითვისებენ ალკანებს, ხოლო ციკლოპარაფინები და არომატული ნახშირწყალბადები გაცილებით უფრო ნელა განიცდის ასიმილაციას. ნავთობის კომპონენტთა სრული დეგრადაცია შესაძლებელია მხოლოდ სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების მიკროორგანიზმთა (ბაქტერიები, სოკოები, აქტინობაქტერიები) ცალკეული წარმომადგენლების მონაწილეობით, რაც ბუნებრივ პირობებში პრაქტიკულად განუხორციელებელია.

გასათვალისწინებელია, რომ ნავთობის ნახშირწყალბადთა მიკრობიოლოგიური ტრანსფორმაცია იწვევს შუალედური ნივთიერებების წარმოქმნას, რომელთაც უმრავლეს შემთხვევაში აქვს პოლარული ფუნქციური ჯგუფები: სპირტები, ალდეჰიდები და სხვ. ნახშირწყალბადთა ტრანსფორმაციის ასეთი პროდუქტები ზღვის წყალში უფრო უკეთ იხსნება, ვიდრე ნავთობის ნახშირწყალბადები და, ამიტომ საშიშროებას წარმოადგენს ზღვის ორგანიზმთა სიცოცხლისთვის, რომლებშიც ეს ნივთიერებები ადვილად აღწევს. მნიშვნელოვან ფაქტორებს, რომლებიც მოქმედებს ნავთობის მიკრობიოლოგიური დაშლის პროცესებზე, წარმოადგენს ტემპერატურა, საკვები (ძირითადად ორგანული) ნივთიერებების შემცველობა და წყალში ჟანგბადის პარციალური წნევა.

მთელი პლანეტის მასშტაბით ნიადაგის მდგომარეობის შეფასება გვიჩვენებს, რომ პლანეტის მოსახლეობის დაახლოებით 40-45% ცხოვრობს და მუშაობს ძლიერად დეგრადირებულ სასოფლო-სამეურნეო მიწებზე. ნიადაგების ფუნქციონირების აღდგენა ორგანული ნახშირბადის გაზრდით, ტოქსიკური კონტამინანტების მოცილებით, საკვებ ნივთიერებათა დაბალანსებით, არსებითად გააიოლებს სასურსათო უსაფრთხოების უზრუნველყოფას, კლიმატის დარეგულირებას, აუმჯობესებს მარილნაკლები წყლის ხარისხს და ზრდის მის რაოდენობას, უზრუნველყოფს ნიადაგის საფარის ბიოლოგიურ მრავალფეროვნებას [36-38].

მცენარეებით ჰაერის, წყლის და ნიადაგის რემედიაციის პროცესი განისაზღვრება რიგი ფაქტორებით: სხივის ინტენსივობით, ტემპერატურით, ნიადაგის მიკროორგანიზმების ნაკრებით, მძიმე მეტალების ათვისების უნარით [39, 40, 20].

ამ თავში მოყვანილი მონაცემების შეჯამებით შეიძლება აღინიშნოს ნიადაგის ტოქსიკურ ნივთიერებათა ნაირგვარობა. ამასთან, განსაკუთრებით ხაზი უნდა გაესვას იმას, რომ ქიმიური სტრუქტურების ის მრავალფეროვნება, რასაც ვაწყდებით ნიადაგების რემედიაციის დროს, მოითხოვს თვისებრივად განსხვავებულ ფიტორემედიაციულ ტექნოლოგიებს. სხვადასხვა ტიპის ნიადაგების არსებობა, ტოქსიკური ნივთიერებებისგან რომელთა გასაწმენდადაც საჭიროა სპეციალური ტექნოლოგიები, დამატებით სიძნელეებს ქმნის. აუცილებელია მცენარეების და მიკროორგანიზმების მიზანმიმართული სელექცია და ისეთების შერჩევა, რომლებიც აქტიურად ითვისებენ ანთროპოგენური წარმოშობის ტოქსიკურ ნივთიერებებს. სწორედ ასეთი მიდგომა წარმოადგენს წარმატების ძირითად ფაქტორს ანთროპოგენური ტოქსიკანტებით გაზინძურებული ნიადაგების რემედიაციასა და მონიტორინგში.

1.6. წყალი

გასული საუკუნის ტექნიკურმა და ტექნოლოგიურმა პროგრესმა წარმოშვა ეკოლოგიური პრობლემები, რაც, პირველ რიგში, მავნე კომპონენტებით სასმელი წყლის გაზინძურებას ეხება. წყალი - ის უნიკალურის სუბსტანციაა, რომელსაც ახასიათებს განსხვავებული ფიზიკურ-ქიმიური და ბიოლოგიური თვისებები. სასმელი წყლის თავისებურება ის არის, რომ გამოყენებამდე იგი არა მარტო იწმინდება, არამედ ბუნებრივად მდიდრდება ორგანიკით და მეტალოთა იონებით. წყლის დამუშავების მრავალსტადიურობა წარმოადგენს სასმელი წყლის ქიმიური შედგენილობის განსხვავებისა და სრულფასოვნობის საფუძველს სხვადასხვა გეოგრაფიულ და ნიადაგობრივ-კლიმატურ პირობებში. წყალი წარმოადგენს მოძრავ და ადვილად გაზინძურებად, ანომალური თვისებებით მკვეთრად გამოხატულ სისტემას, რომელიც გარემოს ზემოქმედებაზე დამოკიდებული.

წყალი უნივერსალური გამხსნელია. მასში იხსნება ნივთიერებათა უმრავლესობა ნებისმიერ აგრეგატულ მდგომარეობაში (თხევადი, მყარი, აირადი).

ცოცხალ ორგანიზმებს წყლის გარეშე არსებობა არ შეუძლიათ. წყალი უჯრედის და ქსოვილის სტრუქტურული კომპონენტია. ადამიანში წყლის შემცველობა შეადგენს სხეულის მთელი მასის თითქმის 60%-ს. წყალი შედის უჯრედების ციტოპლაზმასა და ქსოვილურ სითხეში. ქსოვილური სითხე წარმოადგენს შუამავალ კომპონენტს უჯრედულ ელემენტებსა და სისხლს შორის. მისგან უჯრედები იღებენ ყველა საკვებ ნივთიერებას და მისივე საშუალებით გადააქვს ნივთიერებათა ცვლის პროდუქტებს.

წყალი - მრავალი მეტაბოლური რეაქციის (ჰიდროლიზი, ჟანგვა-აღდგენა, სინთეზი, ქიმიური გადაჯგუფებები, ჰიდრატაცია და სხვ.) აუცილებელი კომპონენტია; იგი მონაწილეობს ანაბოლური და კატაბოლური პროცესების განხორციელებაში, კერძოდ, მაკრო-მოლეკულების და ზოგიერთი საკვები კომპონენტების დაშლაში, ორგანიზმისთვის დამახასიათებელი მაღალმოლეკულური და მეორეული მეტაბოლიტების სინთეზში. წყალი უშუალოდ მონაწილეობს უჯრედის ყველა კომპონენტის ფუნქციურ აქტიურობასთან დაკავშირებულ მრავალ ქიმიურ რეაქციასა და გარდაქმნაში. წყალში ხსნადობა განაპირობებს ნივთიერებათა უჯრედული ცვლის ნორმალურ მიმდინარეობას, რაც აუცილებელია ყველა ფიზიოლოგიური პროცესისთვის. წყალთან ერთად ხდება უჯრედში მიმდინარე მეტაბოლიზმის პროდუქტების ტრანსპორტი და ორგანიზმიდან გამოყოფა. წყალი უშუალოდ მონაწილეობს ორგანიზმის სითხური ბალანსის რეგულაციაში (სითბოს შენახვა, განაწილება და გამოყოფა).

წყალი თანამედროვე მრეწველობის პრაქტიკულად ყველა სფეროს ტექნოლოგიური პროცესებისთვის სრულიად აუცილებელი და შეუცვლელი კომპონენტია.

XXI საუკუნეში კაცობრიობის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ამოცანაა სასმელი წყლის მომარაგება და მისი რაციონალური გამოყენება. მსოფლიოს მოსახლეობის მნიშვნელოვანი ნაწილი განიცდის წყლის მწვავე უკმარისობას. მსოფლიოს ცალკეულ რეგიონებში წყლის გამოყენება კატასტროფის ზღვარზეა. ყველა კონტინენტი წყალსაცავების, დიდი და მცირე მდინარეების სისუფთავის დაბალი ხარისხის გამო წყალს დასალებად უვარგისს ხდის.

დედამიწაზე ჯერ კიდევ არის წყლის საკმაოდ დიდი მარაგი,

რომელიც აღემატება 1400 მლნ მ³-ს. მიუხედავად ამისა, მტკნარი წყლის ხვედრითი მოცულობა დაახლოებით 35 მილიონ მ³-ს, ე.ი. საერთო მარაგის მხოლოდ 2,5%-ს შეადგენს. მთელ პლანეტაზე შექმნილ სიტუაციაში განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს ზღვის წყლის გამტკნარება. გაეროს მონაცემებით 2050 წლისთვის პლანეტის მოსახლეობა გადააჭარბებს 9 მილიარდ ადამიანს, რაც, ძალიან დაგვაახლოებს პლანეტაზე ადამიანთა პოპულაციის არსებობის ზღვარს. თუ დღეს ერთ სულ მოსახლეზე წყლის წლიური ხარჯი განვითარებად ქვეყნებში 2,5-3 ათას ლიტრს შეადგენს, მოსახლეობის მოსალოდნელ ზრდასთან ერთად, აუცილებელი გახდება მტკნარი წყლის მარაგის მნიშვნელოვანი შევსება.

ამჟამად არაინფექციურ დაავადებათა დაახლოებით 70% გამოწვეულია წყლის სისუფთავის საჭირო ნორმების დაუცველობით. მრავალწლიანი დაკვირვების შედეგად დადგენილია, რომ თითქმის 8% დაავადებათა ძირითად მიზეზს წარმოადგენს უხარისხო წყალი. წყლით გადამდებ დაავადებათა გავრცელების მონაცემები შემდეგია: მალარია - 800 მლნ. ავადმყოფი, ტრაქომა - 500 მლნ., შისტოსომოზი - 200 მლნ., გასტროენტერიტები - 400 მლნ. გასტროენტერიტების გამო ყოველწლიურად იღუპება 4 მლნ ბავშვი და 18 მილიონი მოზრდილი. ზოგადად, 2 მილიარდი, ე.ი. მთელი პლანეტის მოსახლეობის 25%-ზე მეტი ადამიანის დაავადებები უხარისხო წყლით არის გამოწვეული [41].

სასმელი წყლის ხარისხის განსაზღვრისას უნდა აღინიშნოს ორგანული ნაერთების და ქიმიური ელემენტების განსაზღვრული ნაწილის აუცილებელი არსებობა, რაც ყოველთვის არ ხდება. განსაკუთრებული ყურადღება ენიჭება სასმელ წყალში კალციუმისა და მაგნიუმის მარილების არსებობას, რომლებიც მის სიხისტეს განაპირობებს. მათი მაქსიმალურად დასაშვები დოზები ნორმირებულია კანონმდებლობით. რაც შეეხება წყლის ფიზიოლოგიურ სრულფასოვნებას, მასში კალციუმის შემცველობა უნდა შეადგენდეს 25-130 მგ/ლ-ს, ხოლო მაგნიუმის - 5-65 მგ/ლ-ს. მაღალმინერალიზებული წყლების ხანგრძლივი მოხმარებით ვითარდება შარდკენჭოვანი დაავადებები, სხვადასხვა სახის მარილთა დისბალანსით გამოწვეული პათოლოგიები, გულსისხლძარღვთა დაავადებები, ჰიპერტენზია, ნაადრევი მშობიარობა, ხშირი აბორტები და

სხვ. დაბალმინერალური წყლის მოხმარებით შეიმჩნევა კალიუმის და მაგნიუმის დეფიციტით გამოწვეული დაავადებები, რაც, პირველ რიგში, უარყოფითად აისახება კარდიოვასკულარულ სისტემაზე. გარდა ამისა, წყლის ხარისხი მსოფლიოს ნებისმიერ კუთხეში უნდა შეესაბამებოდეს სპეციფიკურ მახასიათებლებს (რომლებიც დადებითად მოქმედებს ადამიანის ჯანმრთელობაზე) - ორგანო-ლეპტიკურ, ქიმიურ და მიკრობიოლოგიურ მოთხოვნებს. წყლის ქიმიური შემცველობა ხშირად სრულიად მრავალგვარია. წყალში, შესაძლოა, ისაზღვრებოდეს რკინის, იოდის, თუთიის და სხვ. ელემენტების დაბალი კონცენტრაცია. გარდა ამისა, წყალში გვხვდება ისეთი არასასურველი ნივთიერებებიც, რომლებიც ანტროპოგენური წარმოშობისაა.

მრეწველობაში გამოყენებული ტექნიკური წყალიც ასევე უნდა პასუხობდეს სპეციფიკურ მოთხოვნებს შესაძლო მინარევებთან მიმართებაში. წყლის ობიექტების და მიწისქვეშა წყლების ანტროპოგენური გაბინძურების მიზეზებია: საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო კანალიზაციის ჩამდინარე წყლები, რომლებიც შეიცავს გამრეცხ და სადეზინფექციო საშუალებებს და სხვა არადამახასიათებელ კომპონენტებს; წყლები, რომლებიც გამოიყენება აგრარული მიზნით და ხშირად შეიცავს პესტიციდებს და სასუქებს.

ევროკავშირის მონაცემებით, არსებული ეკოლოგიური მდგომარეობის გამო ზღვის ბინადართა 100 ათას სახეობაზე მეტი გაქრობის პირას იმყოფება. მრეწველობის ყველა დარგი (ენერგეტიკა, მედიცინა, ფარმაცოლოგია, სოფლის მეურნეობა, კვების მრეწველობა და სხვ.) მოიხმარს დიდი რაოდენობით წყალს. გარდა ამისა, წყლის ხარისხს და სისუფთავეს დიდი მნიშვნელობა აქვს სოფლის მეურნეობისათვის. მცენარეთა (ხილი, ბოსტნეული, მარცვლოვანი კულტურები) პლანტაციების მორწყვისას უნივერსალური მოთხოვნაა მცირემარტილიანი წყლის გამოყენება.

ჩვენი პლანეტის 510 მლნ კმ² ფართობიდან 360 მლნ კმ² წყლით არის დაფარული. ხმელეთის ფართობი ორნახევარჯერ მცირეა წყლის ზედაპირზე და მიუხედავად ამისა, დედამიწის 11% შეადგენს უდაბნოს და ეროზირებულ მიწებს, წყლის რესურსების უკმარისობის გამო.

გაუწყლოების და ეკოლოგიური წონასწორობის დარღვევის ფაქტია არალის ზღვის ამოშრობა, რომლის ფართობი 30 წლის წინ 58 ათას კმ²-ს შეადგენდა. დღეს ამ ზღვიდან დარჩენილი ცალკეული ტბების საერთო ფართობი დაახლოებით 7 ათას კმ²-ს (მთელი არალის ზღვის 8%-ს) შეადგენს. ამომშრალი ზღვის ფსკერი წარმოადგენს მშრალი მარილების, პესტიციდების და სხვა ქიმიკატების ნარევეს. მაღალი ტემპერატურის პირობებში (50°C-მდე) ხდება ამ ნარევის გადატანა რეგიონში არსებული მშრალი ქარიშხლებით დიდ მანძილზე (400-500 კმ), რაც შუა აზიის ქვეყნებისთვის სერიოზულ ეკოლოგიურ საფრთხეს წარმოადგენს.

სუფთა, მცირემარილიანი წყლის მისაღებად ამჟამად დამუშავებულია ათობით ტექნოლოგია, რომელთა შორის შეიძლება გამოიყოს მხოლოდ ზოგიერთი, რომლებმაც პრაქტიკული გამოყენება მოიპოვა, თუმცა მცირე მასშტაბებით. ასე, მაგალითად, ინტერესს წარმოადგენს სუფთა წყლის წარმოების მემბრანული ტექნოლოგიები, რომელთა ფართომასშტაბიანი გამოყენება, სამწუხაროდ, ჯერ-ჯერობით არ ხერხდება ტექნოლოგიური პროცესის ტექნიკური სირთულეების გამო. გარდა ამისა, სხვადასხვა დანიშნულების წყლის გასაწმენდად შექმნილია ფილტრების განსხვავებული ტიპები: მექანიკური და ბიოლოგიური. არასამრეწველო მასშტაბებში გამოიყენება ელექტროლიზზე და სხვა პროცესებზე დაფუძნებული გაწმენდის ტექნოლოგიები, რომელთა ეფექტიანობა საკმაოდ მაღალია, მაგრამ მთლიანად ვერ უზრუნველყოფს ზღვის წყლის გაუმარილებას.

მიუხედავად მრავალი მცდელობისა, ჯერ-ჯერობით არ ხერხდება მარილიანი წყლის გამტკნარების იაფი და მასშტაბური ტექნოლოგიის შექმნა, რაც პლანეტის დიდი ნაწილის გაუდაზნოების, სოფლის მეურნეობის, ჯანმრთელობის დაცვის, მოსახლეობის სურსათის უზრუნველყოფის პრობლემის გადაჭრის საშუალებას მოგვცემდა, ეს მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებდა ეკოლოგიურ სიტუაციას მთელ პლანეტაზე [42, 43].

მტკნარი წყლის მისაღებად დამუშავებულია რამდენიმე ტექნოლოგია: დისტილაცია, ელექტროდიალიზი, იონური მიმოცვლა, გამოყინვა და უკუოსმოსი. არსებობს ახალი შეხედულებები წყლის გაწმენდაზე. ესენია ფიზიკური მეთოდები, რომლებშიც ელექტრონული და მაგნიტური ველები გამოიყენება.

ნებისმიერ წყალხსნარში გამაბინძურებელთა დიფუზია საკმაოდ სწრაფად მიმდინარეობს. ლოკალურად ბინძურდება არა მარტო ცალკეული წყალსაცავები, არამედ მდინარეთა მონაკვეთები, რომლებშიც ისინი ჩაედინებიან. ზღვის ეკოსისტემებს ყველაზე საგრძნობ ზიანს აყენებს ნავთობით გაბინძურება [44].

ნებისმიერი ცოცხალი ორგანიზმისთვის დამლუპველად მოქმედებს არა მარტო ნავთობპროდუქტებთან უშუალო კონტაქტი. განსაკუთრებულ საშიშროებას წარმოადგენს ურთიერთქმედება წყალში გახსნილ ნახშირწყალბადებთან, კერძოდ, არომატულ და პოლიციკლურ ნახშირწყალბადებთან, რომლებიც საკმაოდ იოლად იჭრება წყლის ბინადარ ორგანიზმებში. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ ტოქსიკანტებმა, ძლიერ დაბალ კონცენტრაციებშიც კი (10%) შეიძლება გამოიწვიოს, არასასურველი ფიზიოლოგიური ცვლილებები რაც 10^{-6} - 10^{-5} % რიგის კონცენტრაციის პირობებში შეინიშნება. 10^{-1} - 10^{-2} % დიაპაზონი წარმოადგენს ლეტალურ დოზას მატლებისთვის, ზღვის უხერხემლოებისთვის, კობოსმაგვართათვის, ლოკოკინებისთვის და თევზებისთვის. მხოლოდ ზღვის მცენარეები უძლებს 10^{-2} - 10^{-1} % კონცენტრაციებს.

სასმელი წყალი მრავალი მაჩვენებლით კონტროლდება, თუმცა შესაძლო მინარევთა სპექტრი წყლის გაწმენდის შემდეგაც კი საკმაოდ მრავალფეროვანია. სასმელი წყლის გამოყენების ისტორიას ახსოვს ფატალური შედეგების მქონე ადამიანთა მასობრივი ინფექციური დაავადებები. ამიტომ წყლის გაწმენდისას მნიშვნელოვანია ტექნოლოგიები, რომელთა მიზანია წყლის გამაბინძურებელი ქიმიური და ბიოლოგიური ფაქტორების მოცილება: ქიმიური ტექნოლოგიების მეთოდებით წყლის გაუვნებელოება და წყლისგან პათოგენური ბაქტერიების, მიცელიალური სოკოების, ვირუსების და ა.შ. მოცილება. ამ მიზნებისთვის ხშირად იყენებენ ქლორს და ოზონს, რომლებიც, გარდა ძირითადი დანიშნულებისა (წყლის დეზინფექცია), ურთიერთმოქმედებს წყალში გახსნილ ჰუმინის მჟავათა ნაშთებთან, ნავთობპროდუქტებთან, სარეცხ საშუალებებთან, პესტიციდებთან და სხვა ქიმიურ ნაერთებთან, რომლის დროსაც წარმოიქმნება ქლორის, ფოსფორისა და აზოტის შემცველი ორგანული ნაერთები, მათ შორის დიოქსინებიც. ეს ნივთიერებები, რომელთაც წყალი უმცირესი კონცენტრაციებით შე-

იცავს, მუტაგენური და კანცეროგენური თვისებებით ხასიათდება. წყლიდან ყველა ქიმიური და ბიოლოგიური გამაბინძურებელი აგენტის მოცილების სანდო მეთოდები ჯერ არ არსებობს. სასმელი წყლის მუტაგენობის და კანცეროგენობის პრობლემას გაერო განსაკუთრებულ ყურადღებას უთმობს ონკოლოგიურ და მემკვიდრეობით დაავადებათა ზრდასთან დაკავშირებით. ბოლო წლების გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ სასმელი წყლის მუტაგენობის ნებისმიერი გამოვლინება წარმოადგენს ისეთი მძიმე და ფატალური დაავადებების ძირითად მიზეზს, როგორიცაა კიბო, ათეროსკლეროზი, თავის ტვინის სისხლძარღვთა სკლეროზი და გენოფონდის სხვა შეუქცევადი დაზიანებები. არსებობს მოსაზრება, რომ მხოლოდ წყლის მინარევეებისგან გაწმენდა არ არის საკმარისი.

ამიტომ, მრავალი მეცნიერი და კომპანია, რომლებიც ჩართულია წყლის გაწმენდაში დაკავებულია პრობლემით: როგორ დამუშავდეს ზღვის წყალის სამრეწველო, ეკონომიკურად მისაღები ტექნოლოგია მისი სასმელი წყლად გარდასაქმნელად.

პლანეტის ცალკეული რეგიონების გაბინძურება მძიმე მეტალებით და ორგანული ტოქსიკანტებით არათანაბრად მიმდინარეობს. მსოფლიოში არსებობს ეკოლოგიურად სუფთა ქვეყნები, მაგალითად, კანადა, შვედეთი, ფინეთი, შოტლანდია, ნორვეგია, ისლანდია და ზოგიერთი სხვა. დანარჩენი ქვეყნების ტერიტორიების ეკოლოგიური მდგომარეობა შეიძლება შეფასდეს როგორც მცირედ, საშუალოდ და ძლიერად გაბინძურებული არეალები.

უნდა აღინიშნოს, რომ დედამიწის ეკოლოგიური მდგომარეობა უკვე იმყოფება რთული, არაბუნებრივი უარყოფითი ფაქტორებით დამძიმებულ მდგომარეობაში, რაზეც მეტყველებს თუნდაც გლობალური დათბობის პროცესი, რამაც უკვე გამოიწვია ოკეანის დონის, რიგი ინფექციური დაავადებების მომატება. ეკოლოგიური სიტუაციის გართულებაზე მიუთითებს ანომალიურად მაღალი ტემპერატურა სხვადასხვა რეგიონში, გვალვა. შექმნილი მდგომარეობა მოითხოვს განსაკუთრებულ ყურადღებას ადამიანის მოღვაწეობის ყველა ეტაპზე, რაც საჭიროებს ახალი მიდგომების შემუშავებას სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვან პრობლემათა გადასაჭრელად. ამ შემთხვევაში, საჭიროა თვისებრივად ახალი მასშტაბის ტექნოლოგიები, რომლებიც დაკავშირებულია ზღვის წყლის გაუმარი-

ლებასთან, წყლის რესურსების რაციონალურ გამოყენებასთან, გამაბინძურებელი ნიადაგების და წყლის გაწმენდის ახალ, ეფექტიან ტექნოლოგიებთან.

1.7. ტოქსიკურ გამაბინძურებელთა გარემოში გავრცელება

ტოქსიკური ნივთიერებები პირველადი გაბნევის შემდეგ ჰაერს, წყალს და ნიადაგს შორის ნაწილდება. სხვადასხვა ფიზიკური ფაქტორების მოქმედების შედეგად ნივთიერებები სხვადასხვა მანძილზე გადაიტანება, რასაც გეოგრაფიულ გადატანას უწოდებენ და რაც, ძირითადად, ჰაერის და წყლის ნაკადებით ხორციელდება.

1.7.1. ტოქსიკურ ნაერთთა გეოგრაფიული და ბიოტური გადატანა

ატმოსფერული გადატანა გარემოში ქიმიური ნივთიერებების გადატანის მნიშვნელოვან გზას წარმოადგენს. ჰაერში ნივთიერებათა გადატანა დამოკიდებულია ატმოსფეროში ტოქსიკანტების განაწილების ვერტიკალურ სტრუქტურაზე, ქარის ინტენსივობაზე, მიმართულებასა და სიჩქარეზე. ნივთიერებების ჰაერთან შერევის პროცესში მათი გადატანა ტროპოსფეროში სწრაფად მიმდინარეობს, ხოლო ტროპოსფეროს და სტრატოსფეროს შორის მიმოცვლა შეიძლება რამდენიმე წელს გრძელდებოდეს. ლოკალურ უბანში უცხო ნაერთების ტროპოსფერული გადატანა რამდენიმე წუთში ხორციელდება, რეგიონულ მასშტაბში საათებისა და დღეების განმავლობაში გრძელდება, ხოლო ნივთიერებათა გლობალური გადატანის ხანგრძლივობა დღეებითა და თვეებით იზომება. ნახევარსფეროს ფარგლებში ტოქსიკურ ნივთიერებათა ჰაერთან სრული შერევის პერიოდი ორი კვირიდან სამ თვემდე მიმდინარეობს, ხოლო ნახევარსფეროებს შორის სრული დიფუზია დაახლოებით ერთი წლის განმავლობაში მიმდინარეობს, რამდენადაც დაბალი წვის ეკვატორული ზონა დედამიწის გარშემო საჰაერო მასების მიმოცვლას ორ ნახევარსფეროს შორის მნიშვნელოვნად ართულებს.

გარდა ამისა, ატმოსფერული გადატანა დაკავშირებულია მეტეოროლოგიურ პირობებთან და დედამიწის ზედაპირის თავისებუ-

რებებთან. აირადი გამაბინძურებლების გადატანის მიმართულება განისაზღვრება ქარის უპირატესი მიმართულებით, ხოლო ტოქსიკური აირების გავრცელების სიმაღლე დამოკიდებულია მის სიჩქარეზე. ქარის სიჩქარის გაზრდით ჰაერთან აირების შერევა უფრო ინტენსიური ხდება, რაც იწვევს ტოქსიკანტების კონცენტრაციის შემცირებას. ამასთან ქარის სიჩქარე აფერხებს ვერტიკალური მიმართულებით ტოქსიკური აირების გავრცელებას, რაც ზღუდავს მათ დაგროვებას ატმოსფეროს მაღალ სფეროებში. ტოქსიკური აირების ჰორიზონტალურ გავრცელებაზე გავლენას ახდენს მთის მასივები, ტყეები, დაბალი და მაღალი წნევების ცვალებადობა, რომლებიც ცვლის ქარის პირველად მიმართულებას. ასევე ატმოსფერული ნალექები შთანთქავს წყალში გახსნილი აირების დიდ ნაწილს.

ტოქსიკური ბუნების აირთა გავრცელებაზე გავლენას ახდენს ასევე ატმოსფეროს ცალკეული ფენების ტემპერატურა. ჩვეულებრივ, ტროპოსფეროში სიმაღლის ზრდასთან ერთად ჰაერის ტემპერატურა ეცემა. დედამიწის ზედაპირის ძლიერი გაცხელება ხელს უწყობს ჰაერის ვერტიკალური ნაკადების წარმოქმნას, რომლებსაც ზევით ააქვს საწარმოების და ტრანსპორტის მიერ გამოყოფილი ტოქსიკური ნივთიერებები. მათი ტემპერატურა ხშირად აჭარბებს ჰაერის ტემპერატურას, რაც ასევე იწვევს ტოქსიკური აირების ვერტიკალური მიმართულებით გადაადგილებას. ამ პირობებში აირები დაუბრკოლებლად აღწევს ზედა ფენებს და მათი გავრცელების სიმაღლე შეადგენს 500-700 მეტრს და მეტს. აირთა ვერტიკალური გავრცელება მნიშვნელოვნად კლებულობს ტემპერატურული ინვერსიის დროს, ანუ როცა სხვადასხვა მიზეზის გამო სიმაღლესთან ერთად ტემპერატურა კი არ მცირდება, არამედ პირიქით, იზრდება. ასეთ მოვლენას ადგილი აქვს ღამით ჰაერის ფენების უეცარი გაცივების შემთხვევაში, ან ჰაერის თბილი ნაკადის განლაგებისას ცივ ქვედა ფენებზე. პირველ შემთხვევაში, ინვერსიული ფენის სისქე შეადგენს ათეულობით მეტრს, ხოლო ტემპერატურის ზრდა მერყეობს დაბალი ტემპერატურიდან 15-20 °C-მდე. დღის დადგომისას მზის გავლენით ტემპერატურის ასეთი სხვაობა სწრაფად ქრება. მხოლოდ შემოდგომასა და ზამთარში, როცა დედამიწა უმნიშვნელოდ ცხელდება, მისი მუდმივი ტემპერატურა დღის განმავლობაში შესაძლებელია შენარჩუნდეს. სხვა შემთხვე-

ვაში ინვერსიის მიზეზს წარმოადგენს ანტიციკლონით შეკუმშული ჰაერის გაცხელება ტროპოსფეროს მაღალ ფენებში. თბილი ჰაერის ინვერსიული ფენები ლაგდება დედამიწის ზედაპირის ცივ ფენებზე, რომლებიც ვერ ასწრებს გათბობას. ინვერსიის შედეგად აირადი ტოქსიკანტები გროვდება ინვერსიული ფენის ქვევით და აბინძურებს დედამიწის მიმდებარე საჰაერო სივრცეს. ეს სმოგის წარმოქმნის ერთ-ერთი ძირითადი მიზეზია.

ოკეანის ზედაპირზე ატმოსფერულ ცირკულირებას იწვევს ზღვის დინებები, რომელთაც დაბალ განედებზე ანტიციკლონური ხასიათი აქვს, საშუალო და პოლარულ განედებზე - ციკლონური პასატური ქარების გავლენით წარმოიქმნება დასავლეთისკენ მიმართული ძლიერი პასატური დინებები, რომლებიც კონტინენტთა აღმოსავლეთის ნაპირებზე იცვლის მიმართულებას და ვრცელდება სანაპიროს გასწვრივ 40-50°-ის განედამდე. ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს უფრო მაღალ განედებში ძლიერი ქარები ამ დინებების მიმართულებას საპირისპიროთი ცვლის და თბილ დინებებს წარმოქმნის (მაგალითად, გოლფსტრიმის ატლანტიკურ ოკეანეში და კუროსიოს - წყნარ ოკეანეში). სამხრეთის განშტოებები, უფრო სუსტი და ცივი დინებების სახით, მოძრაობს სანაპიროების გასწვრივ, უერთდება ჩრდილოეთის პასატური დინებების განშტოებებს და, ამგვარად, იკვრება ანტიციკლონური წრე. ატლანტიკის და წყნარ ოკეანეებში ასეთი ანტიკლონი წარმოიშობა სამხრეთ ნახევარსფეროშიც. ინდოეთის ოკეანეში ზღვის დინებებს სეზონური ხასიათი აქვს და იცვლება იქ გაბატონებული ქარების - მუსონების მიმართულებით.

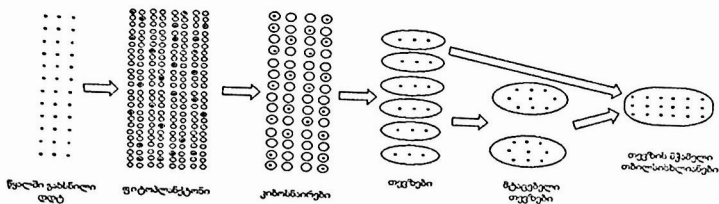
უკიდურესი ჩრდილოეთის და სამხრეთის ცივი წყლები ქმნის რამდენიმე ციკლონურ წრეს: ოკეანეების წყლების ცირკულაცია მიმდინარეობს ვერტიკალური მიმართულებითაც დინებათა კონვერსიის (შეკვრის) და დივერგენციის (გაყრის) შედეგად, ასევე წყლების კონვექციური შერევის დროს. გარდა ამისა, წყლის მოძრაობა მსოფლიო ოკეანეში შეიძლება გამოწვეული იყოს ლოკალური ქარებით, მოქცევებით, უკუქცევებით, მიწისქვეშა მიწისძვრებით და ა.შ. ოკეანისთვის დამახასიათებელი ცირკულაცია ხელს უწყობს ქიმიური გამაბინძურებლების გლობალურ გადატანას და ეს შეი-

ძლება რამდენიმე წლის განმავლობაში გაგრძელდეს. ტოქსიკანტების მდინარეებით გადატანას არ გააჩნია არსებითი მნიშვნელობა მათი რეგიონალური განაწილებისთვის, მაშინ როცა ზედაპირული და გრუნტის წყლები წარმოადგენს უმნიშვნელოვანეს ობიექტებს ტოქსიკანტების ლოკალური განაწილების დროს.

გეოგრაფიულ გადატანასთან ერთად ბიოსფეროში ასევე მიმდინარეობს ტოქსიკური ნაერთების ბიოტური გადატანა, რომელიც ხორციელდება ცოცხალი ორგანიზმების მიერ. ბიოტური გადატანის მასშტაბები, ჩვეულებრივ, ნაკლებია, ვიდრე გეოგრაფიულის. ბიოტური გადატანა ხორციელდება იმ მწერების, ჩიტების, თევზების და ცხოველების აქტიური გადაადგილებით (გადამფრენი ჩიტების და სხვა ცხოველების სეზონური მიგრაციები, საქონლის ბაზრობები და გადარეკვები და ა.შ.), რომლებიც თავიანთ ორგანიზმებში ეკოტოქსიკანტებს აკუმულირებენ. ასევე ძალზე მნიშვნელოვანია ტოქსიკური ნივთიერებების გადატანა ერთი ორგანიზმიდან მეორეზე, რაც კვების ჯაჭვით ხდება. ნივთიერებების გადატანის ბიოტურ პროცესს მიეკუთვნება ადამიანთა მოქმედებები, რომელთა შედეგადაც ქიმიური ნივთიერებებით გაბინძურებული სამშენებლო მასალები, სასოფლო-სამეურნეო პროდუქტები და ა.შ. ლოკალური და რეგიონალური მასშტაბით ვრცელდება. ტოქსიკანტების გავრცელებაში გარკვეულ როლს ასრულებს წყლის ჭიებით იმ ქიმიური ნივთიერებების (პესტიციდები, დიოქსინები, ვერცხლისწყალი და სხვ.) მეორეული გადატანა, რომლებიც ფსკერზეა დალექილი, რაც განაპირობებს წყლის ფაზაში ტოქსიკანტების თანდათანობით გადასვლას.

ტოქსიკანტების გადატანის ბიოტური პროცესებიდან სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი და აქტუალურია კვების ჯაჭვში გადატანა. სწორედ ეს პროცესია ადამიანის ორგანიზმში ტოქსიკური ნივთიერებების მოხვედრის ერთ-ერთი მთავარი გზა.

კვების ჯაჭვი წარმოადგენს სხვადასხვა ორგანიზმებს შორის ურთიერთკავშირის ერთ-ერთ ძირითად ფორმას. კვების ჯაჭვში ტოქსიკანტის გადაადგილების კლასიკური მაგალითია ინსექტიციდ დდტ-ს გადატანა, რომელიც ბუნებრივ პირობებში წყლის ორგანიზმებით იწყება (ნახ. 10) [45].



ნახ. 10. დდტ-ს გადატანა კვების ჯაჭვით

მაგალითად, როდესაც დდტ თვითმფრინავიდან იფრქვევა წყალსაცავებში, სადაც მალარიის გადამტანი კოლო ანაფელესი ბუდობს, ტოქსიკანტი წყალმცენარეებში ხვდება, ფსკერზე ილექება ან მიკროორგანიზმებით შთაინთქმება, ე.ი. კვებითი ჯაჭვის საწყის რგოლში ხვდება და, შესაბამისად, ორგანიზმებში მისი გადატანა იწყება.

კვების ჯაჭვის შემდგომ რგოლებში გადასვლისას, ე.ი. ტროფიკული დონის ამალეებისას ტოქსიკანტი ცოცხალი ორგანიზმების ქსოვილებში უფრო მეტად კონცენტრირდება. როგორც წესი, ტროფიკული დონის ყოველ ახალ საფეხურზე გადატანისას ორგანიზმში ტოქსიკანტის კონცენტრაცია, ბიომასის ერთეულზე გადაანგარიშებით, დაახლოებით 10-ჯერ იზრდება, რაც განპირობებულია შემდეგი ფაქტორებით:

1. ორგანიზმში მოხვედრილი ტოქსიკური ნივთიერებები უმრავლეს შემთხვევაში ძნელად მეტაბოლიზდება, ან საერთოდ არ მონაწილეობს ორგანიზმის პლასტიკურ და ენერგეტიკულ ცვლაში. მათი ბიოლოგიური ნახევრადდაშლის პერიოდი ხანგრძლივია და ისინი ორგანიზმში უცვლელი სახით რჩებიან. ამ ნაერთთა ნაწილი მცენარეთა ვაკუოლებში, ლიპიდებსა და ცხიმოვან ქსოვილებში აკუმულირდება. ნაწილობრივი გარდაქმნის შემთხვევაში ისინი შიგაუჯრედული ორგანული ნაერთებით, მათ შორის ბიოპოლიმერებით (ცილები, პოლისაქარიდები) იზოქებიან, რის

შემდეგაც ორგანიზმიდან მათი გამოდევნა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

2. დაგროვილი ტოქსიკანტი იწვევს ორგანიზმების მოწამვლას, რის შედეგად ისინი ხდებიან ნაკლებად მოძრავნი, კარგავენ სისწრაფეს, რეაქციას და ადვილად ხდებიან სხვა მტაცებელთა ნადავლი.

ცოცხალ ორგანიზმში ქიმიური ტოქსიკანტის შეღწევა ხდება როგორც კვების შედეგად (ეკოლოგიურ ქიმიიაში ნივთიერებათა კონცენტრირებას კვების ხარჯზე ბიოგამრავლება ეწოდება), ისე გარემოდან შეჭრის შედეგად (ბიოკონცენტრირება).

ბიოაკუმულაციის პროცესი ჰიდრობიონტებისთვის (წყალში მცხოვრები ორგანიზმები) ძირითად ბიოკონცენტრირებით არის განპირობებული. ტოქსიკანტების კონცენტრაცია ორგანიზმში განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$C_A = \frac{K_1}{K_2} \cdot C_W = K_{BC} \cdot C_W$$

სადაც C_A - ორგანიზმში ნივთიერების წონასწორული კონცენტრაციაა (მკგ/კგ), C_W - ნივთიერების კონცენტრაცია წყალში (მკგ/ლ), K_1 - მოხმარების სიჩქარის მუდმივა (დღელამე⁻¹), K_2 - გამოყოფის სიჩქარის მუდმივა (დღელამე⁻¹), K_{BC} - ბიოკონცენტრირების კოეფიციენტი.

როგორც ფორმულიდან ჩანს, წყლის ორგანიზმებში ტოქსიკურ ნივთიერებათა შემცველობა დამოკიდებულია როგორც ამ ნივთიერებათა კონცენტრაციაზე, ასევე ბიოკონცენტრაციის კოეფიციენტზე (K_{BC}), რომელიც წარმოადგენს ორგანიზმში უცხო ნივთიერებათა შეჭრის სიჩქარის ფარდობას ორგანიზმიდან მათი გამოყოფის სიჩქარესთან. ქიმიური ნივთიერებები K_{BC} სიდიდის მიხედვით შეიძლება რამდენიმე რიგით განსხვავდებოდეს, რაც დამოკიდებულია, როგორც ნივთიერების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე, ასევე ორგანიზმის თავისებურებებზე, პირველ რიგში, მათში ლიპიდების შემცველობაზე, რომლებშიც ხდება ყველაზე ტოქსიკური ნივთიერებათა აკუმულირება. ამის გამო გარემოს ქიმიური დამბი-

ნძურებლებისათვის უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია ნ-ოქტანოლ/წყლის ნარევი განაწილების კოეფიციენტი (K_{ow}), რაც ლიპოფილურობის (ცხიმში ხსნადობის უნარი) საზომს წარმოადგენს. K_{oc} და K_{ow} კოეფიციენტთა ლოგარითმებს შორის არსებობს წრფივი დამოკიდებულება, რაც მიგვანიშნებს, რომ ლიპოფილური ტოქსიკანტების დაგროვება წყლის ორგანიზმებში არის ამ ნივთიერებათა განაწილება წყლის ფაზას და ორგანიზმის ლიპიდურ ქსოვილებს შორის. მიუხედავად ამისა, ტოქსიკანტების ბიოკონცენტრირება სხვა მრავალ ფაქტორზეცაა დამოკიდებული, მაგალითად, მემბრანათა სპეციფიკაზე, ტოქსიკანტების ბიოტრანსფორმაციის თავისებურებებზე და ა. შ.

ჰიდრობიონტებისგან განსხვავებით, ხმელეთის ცხოველებში ტოქსიკურ ნივთიერებათა ბიოაკუმულაცია, ძირითადად საჭმლის მომნელებელ ტრაქტში ორალური გზით მოხვედრის შედეგად მიმდინარეობს, თუმცა აკუმულაციის პარამეტრები ამ ორგანიზმებშიც K_{ow} სიდიდეზეა დამოკიდებული. ხმელეთის ცხოველებში ტოქსიკური ნაერთების ლოკალიზაციაზე დიდ გავლენას ახდენს ფერმენტული გარდაქმნები, რომლებიც ძირითადად ღვიძლში მიმდინარეობს, სადაც ხორციელდება ტოქსიკანტთა ბიოტრანსფორმაცია და დეტოქსიკაცია. წყლის ორგანიზმებთან შედარებით მიკროორგანიზმებში, მცენარებსა და ხმელეთის ცხოველებისთვის ქსენობიოტიკთა ბიოტრანსფორმაცია გაცილებით ინტენსიურად მიმდინარეობს. უმაღლესი მცენარეები, რომლებიც წარმოადგენს უნივერსალურ დეტოქსიფაქტორებს, ტოქსიკური ნაერთების შეთვისება შეუძლიათ როგორც ნიადაგიდან, ასევე წყლიდან და ჰაერიდანაც.

1.7.2. ტოქსიკურ ნაერთთა გადატანა ჰაერს, ნიადაგსა და წყალს შორის

ტოქსიკურ ნაერთთა უმრავლესობა ნახშირბადშემცველ ნივთიერებათა დამახასიათებელ წრებრუნვაში მონაწილეობს. ამ გარდაქმნის ალბათობა განისაზღვრება თვით ტოქსიკანტის რიგი თვისებებით, კერძოდ: სტრუქტურის პოლარობით, ლოკალური ბიოტიკური და აბიოტიკური ფაქტორების მიმართ ტოქსიკანტის

სტაბილურობით, ნიადაგის მიკროორგანიზმებით და მცენარეების ზემოქმედებით და ა.შ. ტოქსიკური ნაერთები, ასევე მათი ნაწილობრივი გარდაქმნის პროდუქტები ბიოსფეროში კონცენტრირდება. გარემოში ტოქსიკანტების დაგროვების ნებისმიერი ფორმა იწვევს ლოკალური ეკოლოგიური ბალანსის გაუარესებას. ბოლო დროს დამუშავებულია ეკოლოგიური ტექნოლოგიები, რომლებიც ბიოსფეროში ტოქსიკურ ნაერთთა ნაკადის შემცირების საშუალებას იძლევა. ამ ტექნოლოგიების გამოყენებაში მიღწეული გარკვეული დადებითი ეფექტის მიუხედავად, კვლავ შეიმჩნევა ბიოსფეროში ტოქსიკურ ნაერთთა მზარდი დაგროვება. მოხვდება რა ბიოსფეროში, ტოქსიკური ნაერთები გარემოში ვრცელდება. ეკოსისტემებში ნივთიერებათა გავრცელების დამახასიათებელი ტენდენცია განპირობებულია ფიზიკური, ქიმიური და ბიოლოგიური ფაქტორებით, კერძოდ:

- ტოქსიკანტების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებით - მოლეკულური მასით, წყალში ხსნადობით, ჰიდროფობურობით, ორთქლის კუთრი წნევით (ნივთიერების აქროლადობით), ქიმიურად აქტიური ფუნქციური ჯგუფების არსებობით და ა.შ.
- მასის გადატანის ფიზიკური პროცესებით და ნივთიერებათა ემისიით, როგორებიცაა ადსორბცია, დესორბცია, დიფუზია, კონვექცია, დისპერსია, მშრალი და სველი დალექვა და ა.შ.
- ქიმიური პროცესებით, კერძოდ, ჰიდროლიზით, ჟანგვით, აღდგენით, ფოტოლიზით, ტოქსიკანტების ან მათი წარმოებულების ბუნებრივ ნივთიერებებთან დაკავშირებით და ა.შ.
- ნივთიერებათა ცირკულაციის გეოგრაფიული პროცესებით, მაგალითად, ატმოსფერული გადატანით, ოკეანეთა ცირკულაციებით, მდინარეებით გადატანით და ა.შ.
- ბუნებაში ნივთიერებათა წრებრუნვის გლობალურ პროცესებში მონაწილე ბიოლოგიური პროცესებით. მათ მიეკუთვნება: ბიოკონცენტრირება, ბიოგამრავლება, ბიოაკუმულაცია, ბიოტრანსფორმაცია, ბიოდეგრადაცია, ნივთიერებათა ბიოტური გადატანა და ა.შ.

ტოქსიკურ ნივთიერებათა გავრცელების პირველი სტადიაა მათი კონკრეტული გამოყენების არეალიდან გამოსვლა, ანუ ფუ-გიტიურობა, ე.ი. ნივთიერების მიდრეკილება, გამოვიდეს იმ ფა-ზის საზღვრებიდან, რომელშიც იმყოფება. ამ პროცესის სიჩქარე, პირველ რიგში, დამოკიდებულია გამოყენების კონკრეტულ ტექ-ნოლოგიაზე ან ტოქსიკანტის ადგილმდებარეობაზე (მაგალითად, პესტიციდის გამოყენების შემთხვევაში დიდი მნიშვნელობა აქვს, თუ როგორ ხდებოდა მისი გაფრქვევა - დედამიწის ზედაპირიდან თუ თვითმფრინავიდან).

ტოქსიკურ ნივთიერებათა გამოყენების არეალიდან გამოსვ-ლას მოყვება მოსაზღვრე ეკოსისტემებში მათი არაერთგვაროვანი განაწილება. ტოქსიკანტების განაწილების მნიშვნელოვანი ეტა-პია ნივთიერებათა აბიოტური და ბიოტური გადატანა ნიადაგით, წყლითა და ჰაერით.

ტოქსიკური ნივთიერებები ჰაერში შეიძლება მოხვდეს როგორც უშუალოდ ემისიის წყაროებიდან, ისე ნიადაგისა და წყლის გაბინ-ძურებული ნიშებიდან.

ტოქსიკანტების გადატანა წყალი-ჰაერის ფაზის გამყოფ საზღვა-რზე დინამიკური პროცესია და ორივე მიმართულებით ხორცი-ელდება. წყალხსნარიდან ატმოსფეროში ქიმიურ ნივთიერებათა გადატანის პროცესი (აორთქლება), ისევე, როგორც საპირისპირო მიმართულებით (ჰაერიდან წყალში მშრალი დალექვა) დიფუზიის შედეგად ხორციელდება და საერთო ფიზიკურ კანონზომიერებებს ემორჩილება.

დიფუზიურ პროცესებში ნივთიერებათა ნაკადი კონცენტრა-ციის შემცირების მხარეს არის მიმართული. წყლების ქიმიური გაბინძურების შემთხვევაში, ტოქსიკანტის წყლიდან ჰაერის მიმა-რთულების გადაადგილდება, რადგან ჰაერი უფრო ღია სისტემაა, ვიდრე წყალი და ბუნებრივ პირობებში ქიმიურ ნივთიერებათა კონცენტრაცია აირად ფაზაში მნიშვნელოვნად დაბალია, ვიდრე წყლიანში.

სისტემაში წყალი-ჰაერი ტოქსიკანტების ფუგიტიურობა თით-ქმის მთლიანად არის დამოკიდებული მათ აქროლადობაზე, რო-მელიც განისაზღვრება თხევად და აირად ფაზებში გადატანის სიჩქარით, ტემპერატურით და ჰენრის მუდმივით. ტოქსიკანტის

გადატანის ჯამური სიჩქარე, რომელიც ახასიათებს აქროლადობას, განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით: [46]

$$K = \left[\frac{1}{k_1} + \frac{RT}{k_g H} \right]^{-1}$$

სადაც K არის ნივთიერების გადატანის საერთო სიჩქარე, R - აირთა უნივერსალური მუდმივა, T - თერმოდინამიკური ტემპერატურა, k_1 - სითხეში გადატანის სიჩქარე, k_g - აირად ფაზაში გადატანის სიჩქარე, H - ჰენრის მუდმივა.

ამ განტოლებიდან ჩანს, რომ ჰენრის მუდმივას მნიშვნელობა წარმოადგენს ფაქტორს, რომელიც განაპირობებს წყლის ფაზიდან ნივთიერების აქროლების პროცესს. მაგალითად, ჰენრის მუდმივა თუ მაღალია, რაც ორთქლის მაღალი კუთრი წნევის და/ან დაბალი ხსნადობის (ბენზოლი, ტოლუოლი, ქლოროფორმი ნაერთები და მრავალი სხვა ადვილად აქროლადი ტოქსიკანტი) მქონე ნივთიერებებისთვის არის დამახასიათებელი, სიჩქარის განტოლებაში მარჯვენა შესაკრები ($RT/(k_g H)$) მარცხენაზე ($1/k_1$) მნიშვნელოვნად ნაკლები ხდება. ამ შემთხვევაში ნივთიერების გადატანის სიჩქარე, ძირითადად, დამოკიდებულია k_1 -ის მნიშვნელობაზე, ანუ სითხეში გადატანის სიჩქარეზე. ეს იმას ნიშნავს, რომ ნივთიერების აქროლადობა მხოლოდ თხევადი ფაზით კონტროლება. თავის მხრივ, k_1 განისაზღვრება ნივთიერების მოლეკულური მასით, მისი მოლეკული მოცულობით და გარეშე პირობებით, როგორებიცაა: ტემპერატურა, ხსნარის ტურბულენტობა, სიბლანტე, ზედაპირული დაჭიმულობა და სხვ. აქედან გამომდინარე, თუ ნივთიერების ჰენრის მუდმივა მაღალია (>500 კა·მ³·მოლი⁻¹), ის წყლიდან ჰაერში თითქმის ერთნაირი სიჩქარით გადადის, მათი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებს შორის სხვაობის მიუხედავად. ჰენრის კონსტანტის დაბალი მნიშვნელობის ($<0,5$ კა·მ³·მოლი⁻¹) ნაერთებისთვის, რომლებიც, როგორც წესი, ნაჯერი ორთქლის დაბალი კუთრი წნევით და/ან წყალში მაღალი ხსნადობით გამოირჩევიან, განმსაზღვრელი ხდება უკვე მარჯვენა შესაკრები, ე.ი. მათთვის აქროლადობა აირადი ფაზით კონტროლდება [46].

წყლიდან ნივთიერებათა აორთქლების და ატმოსფეროდან წყალში მათი გადასვლის პროცესებთან ერთად ამ სისტემებს შორის ნივთიერებათა მიმოცვლის სხვა გზებიც არსებობს. ასეთებია: ზღვის წყლის ქარით გაშხეფება და ატმოსფეროში არსებული ტოქსიკანტების გახსნა წვიმის წყალში. ამ გზით წყლის აუზებსა და ატმოსფეროს შორის ქიმიურ ნივთიერებათა გადატანის წილი ბევრად არის დამოკიდებული გეოგრაფიულ მდგომარეობასა და კლიმატურ პირობებზე.

გადატანის პროცესები ნიადაგსა და ჰაერს შორის ყველაზე მოცულობითაა გადასატანი მასის რაოდენობის მიხედვით და მოიცავს მიმოცვლას სამივე ფაზას შორის: სითხე-მყარი ფაზა, სითხე-აირი და მყარი ფაზა-აირი.

ნიადაგიდან ატმოსფეროში და უკუმიმართულებით ნივთიერებათა გადატანა ასევე დიფუზიის საშუალებით ხორციელდება. ამ შემთხვევაში გადატანის სიჩქარე დამოკიდებულია მოლეკულურ მასაზე, ტემპერატურაზე, ადსორბირებული ნივთიერების ნაჯერი ორთქლის წნევაზე და აირად ფაზაში მისი მოძრაობის სიჩქარეზე. ნიადაგსა და ატმოსფერულ ჰაერს შორის ნივთიერებათა მიმოცვლის შემთხვევაში, თითოეული მიმართულებით გადატანის სიჩქარე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ნივთიერების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე, ნიადაგის ტიპსა და კლიმატურ პირობებზე.

ნიადაგის მშრალ ზედაპირზე ადსორბირებული ქიმიური ნივთიერებების ნიადაგიდან ჰაერში გადატანა წყალხსნარების მსგავსად მიმდინარეობს და შემდეგ განტოლებას ემორჩილება:

$$F = \frac{k_g PM}{RT}$$

სადაც F - ნივთიერების ნაკადია, რომელიც გამოისახება, როგორც მასის ერთეულის ფარდობა დროის და ფართობის ერთეულებთან, P - ნაჯერი ორთქლის წნევაა, M - ნივთიერების მოლური მასა, R - აირთა უნივერსალური მუდმივა, T - თერმოდინამიკური ტემპერატურა.

ნიადაგის ტენიანი ზედაპირიდან აქროლება მნიშვნელოვნად მეტი ინტენსიურობისაა, ვიდრე მშრალი ზედაპირიდან. ეს მოვლე-

ნა არ შეიძლება შევადაროთ წყალთან ერთად ნივთიერების თანა-
აორთქლებას, რადგან, პირველ რიგში, თანააორთქლება მიმდი-
ნარეობს ბევრად მაღალ ტემპერატურაზე ტოქსიკანტის მაღალი
კონცენტრაციების შემთხვევებში, ვიდრე ეს ბუნებრივ პირობებშია;
მეორე მხრივ, თანააორთქლების მიზეზია ასაორთქლებელ ნი-
ვთიერებასთან წყლის მოლეკულათა დაკავშირება (წყალბადური
ბმების წარმოქმნა, ჰიდრატაცია და სხვ.), რაც ტოქსიკანტთა უმრავ-
ლესობისთვის არ არის დამახასიათებელი; მესამე - იმ პირობებ-
ში, როცა ნიადაგის ზედაპირი ტენიანი რჩება, მრავალი ტოქსიკა-
ნტის აორთქლების სიჩქარე არ იცვლება, რადგან წყლის ორთქლი
სწრაფად აჯერებს ატმოსფეროს და აორთქლება სწრაფად წყდება.
მაშასადამე, წყლის აორთქლება და ნიადაგიდან ქიმიურ ნივთიე-
რებათა აორთქლება ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად მიმდინა-
რეობს. ნოტიო ნიადაგიდან აორთქლების გაძლიერება, მშრალთან
შედარებით, ძირითადად აიხსნება ქიმიურ ნივთიერებათა ნაწი-
ლობრივი დესორბციით, რაც მიიღწევა წყლის საშუალებით მათი
ელუირების (მოცილების) შედეგად.

ნიადაგის სიღრმეში მოხვედრილი ტოქსიკური ნივთიერება გა-
ნიცდის დიფუზიას ზედაპირის მიმართულებით. ტოქსიკანტები,
რომლებიც ჰენრის მუდმივას მაღალი მნიშვნელობა ახასიათებს
(მაგალითად, ინსექტიციდები: ლინდანი, დდტ, ქლორორგანული
გამხსნელები), ქვედა ფენებიდან ზედაში გადაადგილდება. მათი
აქროლება ისევე ხდება, როგორც წყლის შემთხვევაში. ჰენრის მუდ-
მივას დაბალი სიდიდის მქონე ნივთიერებებისთვის (მაგალითად,
ტრიაზინული ჰერბიციდი პრომეტონი), ქვევიდან ზევით გადა-
ტანა კონვექციისა და კაპილარული ძალების საშუალებით ხორცი-
ელდება, რასაც „ვითილის ეფექტს“ უწოდებენ [47].

ქიმიური ნივთიერებათა აქროლება ნიადაგიდან ატმოსფერო-
ში დამოკიდებულია გარემოს სხვა პირობებზეც, მაგალითად, ნია-
დაგის ტიპზე, ტემპერატურასა და ქარის სიჩქარეზე. ნიადაგიდან
ატმოსფეროში ნივთიერებათა ემისიის კიდევ ერთი გზაა მტვრით
გადატანა (ქარით გამოწვეული ეროზია).

ტოქსიკანტების გავრცელების შესაჩერებლად დიდი ყურა-
დდება ენიჭება დეგრადაციულ მეტაბოლურ პოტენციალს, პირველ
რიგში, მიკროორგანიზმებს და მცენარეებს. ორგანიზმებს, რომლე-

ბიც უშუალოდ მონაწილეობენ აზოტის და ნახშირბადის ნაერთთა წრებრუნვაში, ახასიათებთ მათ შიგაუჯრედულ სივრცეში მოხვედრილ უცხო ნივთიერებათა დეგრადაციის უნიკალური უნარი. მცენარეების და მიკროორგანიზმების დამახასიათებელ თვისებას წარმოადგენს მათი უნარი, დეგრადაციის შედეგად წარმოქმნილი ნახშირბადის ატომები გამოიყენონ ჩვეულებრივი უჯრედული მეტაბოლიტების კონსტრუქციულ სინთეზში, ე.ი. მოახდინონ ტოქსიკანტების უტილიზაცია მცირენარჩენიანი ტექნოლოგიის პრინციპით.

ტოქსიკური ნაერთებით ნიადაგების გაბინძურების პროცესში დიდ როლს ასრულებს ადსორბციის პროცესები. ნიადაგში მოხვედრილი ტოქსიკანტები, შემადგენელი კომპონენტების სხვადასხვა ადსორბციული უნარის გამო, არათანაბრად ნაწილდება. ძირითადად, ისინი სორბირდებიან ნიადაგის ლიპოფილურ ორგანულ მასალაზე, შთაინთქმებიან მინერალური (თიხის) ფენით, ასევე კოვალენტურად უერთდებიან ჰუმინურ კომპონენტებს. ადსორბციის პროცესში მარილხსნარებს სრულად ვერ ამოაქვთ ჰუმინურ ფრაქციებთან დაკავშირებული ტოქსიკანტები ნიადაგიდან. ადსორბცია მნიშვნელოვნად აფერხებს გახსნილ ქიმიურ ნივთიერებათა მასის გადატანას, რაც ნიადაგში ტოქსიკანტების მიგრაციის ძირითად მამოძრავებელ ძალას წარმოადგენს. ნიადაგის მაღალი ფორიანობა, მოლეკულათა დიდი ზომა, კონცენტრაციული გრადიენტის მცირე ძალა და ა.შ. წარმოადგენს დიფუზიის შემანელებელ ფაქტორებს.

ეკოლოგიური თვალსაზრისით, უაღრესად საყურადღებოა ნიადაგიდან წყალში ტოქსიკურ ნაერთთა მიგრაციის საკითხი, რაზეც მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული დასალევედ ვარგისი მიწისქვეშა წყლების სისუფთავის ხარისხი. ნიადაგში ტოქსიკანტები უმრავლეს შემთხვევაში ნაწილობრივ ან სრულ ტრანსფორმაციას განიცდის ნიადაგის მიკროფლორის ფერმენტებით, მცენარეების ფესვთა სისტემით, აგრეთვე მზის სხივების, ჰაერის ჟანგბადის და თვით წყლის გავლენით. ხშირად ასეთი გარდაქმნების კატალიზატორებია ნიადაგის მინერალური კომპონენტები (მაგალითად, მეტალების - რკინის, ალუმინის და სხვა მეტალთა ოქსიდები).

ჰუმუსთან დაკავშირება, ძირითადად, ტოქსიკანტების პოლარული, ფუნქციური ჯგუფების (ჰიდროქსილური, ამინური, კარბო-

ნილური, კარბოქსილური და ა.შ.) ხარჯზე მიმდინარეობს. ეს პროცესები, ერთი მხრივ, ზრდის ტოქსიკანტთა მოლეკულების პოლიმერობას და ამით ხელს უწყობს ტოქსიკანტს და ნიადაგის ორგანიზმებს მასალას შორის წყალბადური და ვან დერ ვალსის კავშირების რმოქმნას; მეორე მხრივ, ტოქსიკანტებს ჰუმუსის კომპონენტებთან (მაგალითად, ჰუმინურ და ფულვომჟავებთან) კოვალენტურად აკავშირებს.

ნიადაგების გაბინძურების კიდევ ერთი მიზეზია თვით ტოქსიკანტების სტაბილურობა, რაც განისაზღვრება მათი ქიმიური სტრუქტურით. დადგენილია ალიფატური ნახშირწყალბადების მდგრადობის მიზეზები ნიადაგში: გარდაქმნების მიმართ უფრო მდგრადია არომატული ნახშირწყალბადები, ამასთანავე არომატულ ბირთვში ჩანაცვლებული ჯგუფების რაოდენობის გაზრდით ნაერთის სტაბილურობა მატულობს. ყველაზე მაღალი მდგრადობით, გამოირჩევა ჰალოგენჩანაცვლებული არომატული ნახშირწყალბადები, განსაკუთრებით იმ შემთხვევებში, როცა ჩანაცვლებელია ქლორის ან ფთორის ატომები.

გარემოდან ტოქსიკურ ნაერთთა სრული მოცილება შესაძლებელია მხოლოდ მათი მინერალიზაციით, ე.ი. როცა ორგანული ნივთიერება იშლება ნახშირორჟანგის, წყლის, ქლორწყალბადის, ამიაკის და სხვა არაორგანულ ნივთიერებათა წარმოქმნით. ნიადაგში ტოქსიკანტების ასეთი დეგრადაცია შესაძლებელია განხორციელდეს როგორც აბიოტური, ისე ბიოტური გზით. აბიოტური გარდაქმნები აერთიანებს თვითმიმდინარე ფოტოქიმიურ და ქიმიურ ჟანგვა-აღდგენით რეაქციებს, ასევე ტოქსიკანტების ჰიდროლიზურ გახლეჩას. ამ პროცესში მონაწილეობს ნიადაგის ორგანული ნივთიერებები, მეტალთა ოქსიდები და მინერალები. მაგალითად, ნიადაგში აბიოტურად მიმდინარეობს: ინსექტიციდების ლინდანის და დდტ-ს აღდგენითი დეჰიდროქლორირება, პარათიონისა და პენტაქლორნიტრობენზოლის ნიტროჯგუფების აღდგენა ამინოჯგუფებად, ფოსფორორგანული ინსექტიციდების ჰიდროლიზი და სხვა პროცესები. თუმცა ტოქსიკური ორგანული ნაერთების სრული დაშლის ძირითად გზას მათი ბიოლოგიური მინერალიზაცია წარმოადგენს, რაც ნიადაგის მიკროფლორით და მცენარეებით ხორციელდება.

ტოქსიკური ნაერთების სტაბილურობა ანუ ქიმიური მდგრადობა ფასდება დროის პერიოდით, რომლის განმავლობაში ხდება 95% ტოქსიკანტის გარდაქმნა. ფიზიკურ-ქიმიური მახასიათებლების მიხედვით მდგრადი ორგანული გამაბინძურებლებია: დიოქსინები, პოლიქლორირებული ბიფენილები, ქლორორგანული პესტიციდთა უმრავლესობა (ალდრინი, დიელდრინი, ენდრინი, ქლორდანი, ლინდანი, ჰეპტაქლორი, ჰექსაქლორბენზოლი, მირექსი, დდტ და სხვ.), პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები და სხვ. დიოქსინებისთვის 95%-იანი დაშლის პერიოდის საშუალო მაჩვენებელია 14-15 წელი, პოლიქლორირებული ბიფენილებისთვის - 4 წელი, ჰეპტაქლორისთვის - 3,5 წელი, ლინდანისთვის - 3 წელი და ა.შ. ფართოდ გავრცელებული სიმტრიაზინული პესტიციდები (სიმაზინი, ტრიაზინი, პრომეტრინი) ნიადაგში უცვლელად დაახლოებით 2 წელი ნარჩუნდება, კარბამატები - რამდენიმე თვიდან 1 წლამდე, ხოლო ფოსფორორგანული ინსექტიციდები (ქლოროფოსი, მეტაფოსი და სხვ.) და ფენოქსიმმარმჟავას წარმოებულები - 2,4-დ, 2,4,5-ტ და სხვები რამდენიმე თვის განმავლობაში იშლება.

მინერალებიდან ძლიერი ადსორბენტებია თიხები, რომელთა მიერ ტოქსიკანტების ადსორბციის უნარი შემდეგ რიგში იზრდება: ილიტები < ბენტონიტები < კაოლინი. ჰუმუსში, ადსორბციის გარდა, ხშირად ხდება ტოქსიკანტების შებოჭვა კოვალენტური და წყალბადური ბმებით, ამიტომ ნიადაგში მოხვედრილ ტოქსიკურ ნივთიერებებს უფრო აქტიურად აკავებს ორგანული მასალა [46].

ტოქსიკანტების მიკრობიოლოგიური დაშლის სიჩქარე დამოკიდებულია მთელ რიგ გარეშე ფაქტორებზე, ასეთებია: ნიადაგში ჟანგბადის კონცენტრაცია, ტემპერატურა, ნიადაგის pH, მიკროფლორისათვის საჭირო არაორგანული და ორგანული საკვები ნივთიერებების არსებობა და სხვ. ყველა ამ ფაქტორებიდან უმნიშვნელოვანესია ჟანგბადის შემცველობა, რომელიც ახდენს როგორც აერობული, ისე ანაერობული მიკროორგანიზმების გამრავლების ინტენსივობის ლიმიტირებას.

უმრავლეს შემთხვევაში, განსაკუთრებით ქლორორგანული მოლეკულების ბიოლოგიური დეგრადაციისათვის, საჭიროა ანაერობული და აერობული მიკროორგანიზმების ერთობლივი მოქმე-

დება. როგორც წესი, პირველ რიგში, აუცილებელია ქლორის მემბრის მოცილება ან ჰიდროქსილის ჯგუფებით მათი შეცვლა. ამ ბით, ჟანგბადით გაღარიბებულ ნიადაგებში ხორციელდება ასეთი ზემოქმედების შედეგად ტოქსიკანტიდან ხშირად რჩება არომატული ბირთვი, რომელიც ხელმისაწვდომია აერობული მიკროორგანიზმების, უჯრედგარეშე ოქსიდაზებისთვის (პეროქსიდაზები, ლაკაზები, ლიგნინაზები, ფენოლაზები და სხვ.). ჩვეულებრივ, მიკროორგანიზმების ანაერობული და აერობული ფორმების მოქმედება, და მათი მონაცვლეობა შესაძლებელია დამოკიდებული იყოს დროის ფაქტორზე.

1.7.3. ქიმიური ავარიები

სამრეწველო ავარიები და კატასტროფები, რომელთა შედეგად გარემოში დიდი რაოდენობით ხვდება მაღალტოქსიკური ნივთიერებები, ცივილიზაციის ნამდვილ კატასტროფად იქცა. თუ რამდენად სერიოზული და საშიშია ეს გარემოსთვის, ადვილად ჩანს ქლორთან დაკავშირებულ ავარიების მაგალითებიდან.

ქლორი თხევადი სახით უდიდეს საშიშროებას წარმოადგენს. აირადი ქლორი 2-ჯერ მძიმეა ჰაერზე. თხევადი ქლორის გაფრქვევისას სასიკვდილოდ საშიშ ზონას წარმოადგენს გაფრქვევის ადგილიდან დაახლოებით 400 მეტრი რადიუსის მქონე ტერიტორია [48].

სავარაუდოდ, ქიმიურ ავარიების ალბათობის ტენდენცია ახლო მომავალშიც შენარჩუნდება. ასეთი ვარაუდისთვის არსებობს მთელი რიგი დასაბუთებული წინაპირობა:

- საწარმოო კომპლექსის არაპროგნოზირებადი ზრდა, ახალი ტექნოლოგიების გამოყენება, რომლებიც მოითხოვს ენერჯის მაღალ კონცენტრაციას და ტექნოლოგიურ პროცესებში ეკოლოგიურად საშიშ ნივთიერებათა გამოყენებას;
- გარემოსთვის საშიშ სხვადასხვა წარმოებათა ნარჩენების განსაკუთრებით დიდი რაოდენობით დაგროვება;
- საშიშ ქიმიურ ნივთიერებათა წარმოების, გადაზიდვის და შენახვის გარდაუვალი ზრდა;

- ინვესტიციები განვითარებადი ქვეყნების ტერიტორიებზე ეკოლოგიურად მავნე წარმოებების გასახსნელად.

ზემოდ მოყვანილი ინფორმაცია ეხება მხოლოდ ადამიანის მოღვაწეობის ერთ-ერთ სფეროს - ავარიებს ქიმიურ წარმოებებში. არ შეიძლება არ აღინიშნოს პრაქტიკულად ყველა ქვეყნისთვის სამხედრო მოქმედებებით მიყენებული ეკოლოგიური ზარალი. როგორც წესი, ტოქსიკური ნივთიერებებით მოწამვლის მაღალი ხარისხით გამოირჩევა საომარი მოქმედებების ტერიტორიები, სამხედრო ბაზების დისლოკაციის ადგილები და საწვრთნელი პოლიგონები.

განსაკუთრებით უნდა აღინიშნოს ტოქსიკურ ნივთიერებათა ემისიის ისეთი „მშვიდობიანი“ წყარო, როგორიცაა ავტოტრანსპორტი, რომელიც, ყოველგვარი ავარიის გარეშეც ყოველდღიურად გამოყოფს უსაზღვრო რაოდენობის ტოქსიკურ ნივთიერებებს - სავწავის წვის პროცესში წარმოქმნილ პროდუქტებს, რომელთაც კანცეროგენური თვისებები ახასიათებს.

შესაძლო ეკოლოგიურ კატასტროფებში არსებითი წვლილი შეაქვს სავწავის პრაქტიკულად ნებისმიერ სახეობაზე მომუშავე, სხვადასხვა პროფილის ქარხნიდან გამოყოფილ ტოქსიკურ აირებს. დიდ ეკოლოგიურ საშიშროებას წარმოადგენს, განსაკუთრებით, განვითარებად ქვეყნებში, ტოქსიკურ ნივთიერებების შემცველი წარმოების ნარჩენების ყოველწლიური ზრდა.

გარემოში ტოქსიკურ ნივთიერებათა ემისიის წყაროების ასეთი არასრული ჩამონათვალიც კი გვიჩვენებს, რომ პლანეტის ამჟამად არსებულ ეკოლოგიურ პოტენციალს არ შეუძლია ეკოტოქსიკანტების, მზარდი დონის უვნებელყოფა, რომელიც სწრაფად ვრცელდება მთელ პლანეტაზე. ტოქსიკურ ნივთიერებათა მუდმივად მზარდი დონე უარყოფით არსებით გავლენას ახდენს ცოცხალ ბუნებაზე, უაღრესად ნეგატიურად ზემოქმედებს ისეთ მნიშვნელოვან სასიცოცხლო ბიოლოგიურ პროცესებზე, როგორებიცაა: სუნთქვა, ფოტოსინთეზი, მოლეკულური აზოტის ფიქსაცია, ორგანიზმების ზრდა, გამრავლება. გამოირჩევიან რა საკმაოდ ძლიერი მუტაგენური მოქმედებით, ტოქსიკურ ნაერთთა მაღალი კონცენტრაციები იწვევს ორგანიზმთა ზოგიერთი სახეობის განადგურებას და ახალი, ბუნებისთვის არადამახასიათებელი, ხშირად დეგენერაციული სახეობების წარმოქმნას.

ეკოლოგიურ კვლევათა დიდი უმრავლესობა საყოველთაო დათბობით კლიმატის ცვლილებას ამ მოვლენას უშუალოდ ნახ- შირბადოვან ციკლს უკავშირებს. ატმოსფერული ჰაერის ქიმიური შედგენილობა ეკოლოგიური სიტუაციის შესანიშნავი ილუსტრა- ციაა არა მარტო კონკრეტული ოლქისთვის, არამედ მთელი რე- გიონისთვის ზოგადად. ამასთან, სწორედ ჰაერია ყველა ცოცხალ სისტემაზე ძლიერ აქტიურად მოქმედი ფაქტორი.

გარემოს ტოქსიკური დონის შემცირებაზე დაფუძნებული მრავალფეროვან-ეკოლოგიურ ღონისძიებებს შორის პირველხარისხო- ვან როლს ასრულებს ეკოლოგიური ტექნოლოგიები, რომლებიც დაკავშირებულია ბუნების ყველა ეკოლოგიურ ნიშაში ნებისმიერი ბუნებრივი ან ანთროპოგენური კონტამინატების კონცენტრაციე- ბის შემცირებასთან.

ამგვარად, ადამიანის ორგანიზმზე და გარემოზე დამაბინძუ- რებელი ნივთიერებათა (მყარი, თხევადი და აირადი) ზემოქმედე- ბის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მათი უარყოფითი ზემოქმედების ხარისხი დამოკიდებულია ქიმიურ შედგენილობაზე, ფიზიკურ თვისებებზე, კონცენტრაციებზე, ზემოქმედების ხანგრძლივობაზე, ასევე მრავალ სხვა მახასიათებელსა და ფაქტორებზე, რომლებიც მოითხოვს განსაზღვრულ სისტემატიზაციას.

თავი 2. ბუნებრივი და ტექნოგენური ტოქსიკური ნივთიერებები

ბუნებრივი ეკოლოგიური ნიშები ხასიათდება სხვადასხვა ტოქსიკური სტრუქტურების მქონე ქიმიურ ნივთიერებათა დაგროვების უნარით, რომელთა ცვლილების დინამიკა მკვეთრად აჩვენებს, რომ მათი კონცენტრაცია მუდმივად იზრდება. უცხო ნაერთთა წრებრუნვა მუდმივად ხორციელდება ბუნების მიერ, რომელიც ტოქსიკურ სტრუქტურათა უმრავლესობას ბუნებისთვის მისაღებ ფორმებად გარდაქმნის. მიუხედავად ამ მაგისტრალური ბუნებრივი პროცესისა, ბუნება თავად ქმნის ტოქსიკური ბუნების, გარემოსათვის არადაზიანებელ ნივთიერებებს. თუმცა, ძირითადად, ტოქსიკანტების წარმოქმნა სამრეწველო პროცესების, ენერგეტიკის, ტრანსპორტის და ადამიანის მოღვაწეობის სხვა ფორმების შედეგს წარმოადგენს.

ამგვარად, გარემოს ქიმიური გაბინძურების წყარო შეიძლება იყოს როგორც ბუნებრივი, ასევე ანთროპოგენური. ეკოლოგიური მდგომარეობის ლოკალური გაუარესება შეიძლება გამოწვეული იყოს ბუნებრივი სტიქიური პროცესებით, მაგალითად, ბუნებრივ ნაერთთა ბიოლოგიური დაჟანგვით, ჭაობებიდან (რომლებიც წარმოიქმნება მიკროორგანიზმების აერობული და ანაერობული კონსორციუმების ცხოველქმედებით), ვულკანების ამოფრქვევის შედეგად გამოყოფილი აირებით.

ადამიანის ტექნოგენური მოღვაწეობით გარემოსადმი მიყენებული ზიანი ბევრი მაჩვენებლით მნიშვნელოვნად აღემატება ბუნებრივ პროცესებს. მაგალითად, აშშ ნაციონალური აკადემიის მონაცემებით, მსოფლიო ოკეანეში საშუალოდ იღვრება დაახლოებით 1,3 მილიონი ტონა ნავთობი და ნავთობპროდუქტი. ყველა მონაცემით ზღვის ეკოსისტემებს ყველაზე მასშტაბურ და საგრძნობ ზარალს აყენებს ნავთობის ნახშირწყალბადებით გაბინძურება. ოკეანეებსა და ზღვებში ნავთობი სხვადასხვა მიზეზით ხვდება, მათ შორის მნიშვნელოვანია [49]:

- ტანკერების ავარიები ნავთობის გადაზიდვისას;
- ბუნებრივი გაჟონვა წყალქვეშა შლიეფებიდან;

- ტანკერებში ნავთობის ჩატვირთვის და გადმოტვირთვის, ასევე ტანკერებისა და ცისტერნების გაწმენდის სამუშაოები;
- ნავთობსადენებიდან გაჟონვა და ავარიული დაღვრა;
- ნავთობის მოპოვებისას ჭაბურღილებიდან დაღვრა;
- ნედლი ნავთობის გადამუშავების ნარჩენების არასწორი შენახვა და სხვ.

გამაბინძურებელ ნივთიერებათა მრავალათასიან სიაში ორგანული ტოქსიკური ნაერთები წარმოდგენილია ფართო სპექტრით. ორგანული გამაბინძურებელ ნივთიერებათა უმრავლესობა, არაორგანული ტოქსიკური ნაერთებისგან, განსაკუთრებით, მძიმე მეტალებისგან განსხვავებით, გარემოში მოხვედრისას განიცდის მნიშვნელოვან ბიოტურ და აბიოტურ გარდაქმნებს. ხშირ შემთხვევაში მათი არასრული ტრანსფორმაციის შუალედური პროდუქტები ასევე ხასიათდება საწყისი ნივთიერებების ანალოგიური ან უფრო გაზრდილი ტოქსიკურობით. ამიტომ აუცილებელია, ორგანულ გამაბინძურებელ ნივთიერებათა სრული გაუვნებელყოფა, რის მიღებაც შესაძლებელია მათი სრული დაშლით - მინერალიზაციით. ტოქსიკანტა სტრუქტურაზე ასეთი ზემოქმედება მოითხოვს სპეციალური რემედიაციული ღონისძიებების გატარებას, ეკოლოგიური ტექნოლოგიების და გარემოს მონიტორინგის ჩათვლით.

2.1 ბიოლოგიური წარმოშობის ტოქსიკური ნივთიერებები

ბიოლოგიური წარმოშობის შხამები (ტოქსინები) ბუნებაში ხშირად გვხვდება. ასეთებია, მაგალითად, მწერებში, ცხოველურ ორგანიზმებში, მცენარეებსა და განსაკუთრებით მიკროორგანიზმებში არსებული ცილოვანი ტიპის მაღალმოლეკულური ნაერთები.

ცოცხალი ორგანიზმების მიერ წარმოქმნილი ტოქსინები უარყოფითად მოქმედებს ადამიანის ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური პროცესების მიმდინარეობაზე: აინჰიბირებს ფერმენტების აქტიურობას, არღვევს მეტაბოლიტური პროცესების თანმიმდევრობასა და მსვლელობას. უმრავლეს შემთხვევაში შხამების მოქმედება ლეტალური შედეგით მთავრდება. ტოქსინები მოქმედების მიხედვით შემდეგ ჯგუფებად იყოფა [50, 51] (ცხრილი 1).

ცხრილი 1. ტოქსინების კლასიფიკაცია ადამიანის ორგანიზმზე მათი მოქმედების მიხედვით

N	ტოქსინების დასახელება	ზემოქმედება
1.	ჰემოტოქსინები (Heamotoxins)	მოქმედებს სისხლზე
2.	ნეიროტოქსინები (Neurotoxins)	მოქმედებს ნერვულ სისტემაზე
3.	მიოტოქსინები (Myotoxins)	მოქმედებს კუნთებზე
4.	ჰემორალური ტოქსინები (Haemorrhaginstoxins)	აზიანებს სისხლძარღვებს
5.	ჰემოლიზური ტოქსინები (Heamolysinstoxins)	აზიანებს ერითროციტებს
6.	ნეფროტოქსინები (Nephrotoxins)	არღვევს თირკმლების ფუნქციებს
7.	კარდიოტოქსინები (Cardiotoxins)	ცვლის გულის რიტმს
8.	ნევროტოქსინები (Neurotoxins)	იწვევს ნევროზს

ყველაზე ძლიერ ბუნებრივ შხამად ითვლება ბოტულიზმის ტოქსინი D (სასიკვდილო დოზაა $0,32 \cdot 10^{-6}$ მგ/კგ), რომელიც ტოქსიკურობის ხარისხით მილიონჯერ აღემატება კალიუმის ციანიდს. შემდეგია ბოტულიზმის ტოქსინი A, დიოქსინი, ტეტრადოტოქსინი (თევზი ფუგუ), ზღვის გველების შხამები, კობრის შხამები. არაცილოვანი შხამებიდან ყველაზე ძლიერია ბატრაქოტოქსინი, რომელიც გამოყოფილია კოლუმბიური ბაყაყის კანისგან [52].

ბუნებრივი შხამები, რომლებსაც წარმოქმნიან სხვადასხვა ორგანიზმები თავდაცვის მიზნით წარმოადგენს ნეიროტოქსინებს. ესენია: ბოტულიტოქსინი, პონერატოქსინი, ტეტრადოტოქსინი, ბატრაქოტოქსინი, ფუტკრის, გველის და მორიელის შხამები (ცხრილი 2).

ცხრილი 2. ზოგერთი ბუნებრივი ტოქსინის მახასიათებლები

სახელწოდება	წყარო	მოლეკულური მასა, D	LD ₅₀	
			მგ/კგ	მმოლ/კგ
ბოტულინის ტოქსინი A	ბოტულიზმის ჩხირი	150 000	2,6 · 10 ⁻⁸	1,7 · 10 ⁻¹³
ბოტულინის ტოქსინი B	ბოტულიზმის ჩხირი	167 000	1,0 · 10 ⁻²	6,0 · 10 ⁻¹⁴
ტეტანოსპაზომინი	ტეტანუსის ჩხირი	150 000	2,8 · 10 ⁻⁸	2,0 · 10 ⁻¹³
რიცინი	აბუსალათინის თესლები	65 000	2,8 · 10 ⁻³	4,3 · 10 ⁻⁸
კობროტოქსინი	კობრის შხამი	6 782	5,0 · 10 ⁻²	7,4 · 10 ⁻⁶
ტოქსინი II	მორიელის შხამი	7 249	0,9 · 10 ⁻²	1,2 · 10 ⁻⁶

როგორც ზემოთ მოყვანილი მონაცემებიდან ჩანს, მოქმედების მექანიზმით ბიოლოგიური წარმოშობის ტოქსინები ერთმანეთისგან მნიშვნელოვნად განსხვავდება. ბუნებრივი ნეიროტოქსინები, როგორც უაღრესად მაღალტოქსიკური ნივთიერებები, იცავს მათ წარმომქმნელ ორგანიზმებს (მიკროორგანიზმებიდან ხერხემლიანამდე). ასეთ ნივთიერებათა სხვა კლასს წარმოადგენს ნეიროტოქსინები. ისინი მიეკუთვნებიან ეგზოტოქსინებს.

ჰემოტოქსინები, რომელთაც ცხოველური ორგანიზმები, მცენარეები და მიკროორგანიზმები წარმოქმნიან, აზიანებს სისხლის ერითროციტების გარსებს და შლის სისხლის წითელ ბურთულებს, ე.ი. ჰემოლიზს იწვევს. დადგენილია ბუნებაში სხვადასხვა წარმოშობის ჰემოტოქსინების არსებობა, რომლებიც პათოგენური სტრუქტოკოკების, სტაფილოკოკების და სხვა მიკროორგანიზმების, მცენარეების, ცხოველური ორგანიზმების, პათოგენური ჭიების, ობობების, გველების (შხამები) მიერ სინთეზირდება. ჩამოთვლილი და მთელი რიგი სხვა ქიმიური ნივთიერებების, სამკურნალო პრეპარატების ჩათვლით, მოქმედების შედეგს წარმოადგენს ნეიროტოქსიკურობა, რაც ნერვული სისტემის დაზიანებით გამოიხატება.

ბუნებრივი ტოქსიკური ნაერთების ზემოთ მოყვანილი ჩამონათვალი ბუნებაში არსებული ბუნებრივი ტოქსიკანტების მხოლოდ მცირეოდენი ნაწილია, რომელთა სტრუქტურების და ფუნქციების შესწავლა დიდ სამეცნიერო-პრაქტიკულ ინტერესს წარმოადგენს.

ტოქსიკოლოგიურ ქიმიას, როგოც ბუნებრივ ნაერთთა ქიმიის ერთ-ერთ მიმართულებას, გააჩნია დიდი ინტერესი მედიცინისა და თანამედროვე სასურსათო ტოქსიკოლოგიურ-ეკოლოგიური მეცნიერების თვალსაზრისით.

გარემოსათვის უცხო ქიმიური სტრუქტურის მქონე ნებისმიერი გამაბინძურებელი ნივთიერება, რომელიც არ განიცდის ბიოდეგრადაციას ან ნელა დეგრადირდება, ე.ი. გარემოში მაღალი სტაბილურობით გამოირჩევა, გარკვეული ხარისხით აუცილებლად ავლენს ტოქსიკურ თვისებებს. ამ კატეგორიას მიეკუთვნება გამაბინძურებელ ნივთიერებათა საკმაოდ ფართო სპექტრი, როგორებიცაა: ორგანულ ნივთიერებათა არასრული წვის პროცესში წარმოქმნილი ნივთიერებები, პესტიციდები, სასუქების ზოგიერთი სახეობა, ლაქები და საღებავები, ორგანული გამხსნელები, ემულგატორები, კონსერვანტები, ნავთობპროდუქტები, საყოფაცხოვრებო ქიმიის პროდუქტები, პლასტმასების წარმოებაში გამოყენებული რეაგენტები (პოლიმერები, მონომერები, პიგმენტები, პლასტიფიკატორები, სტაბილიზატორები და სხვ.), ფარმაკოლოგიური მრეწველობის პროდუქტები, ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები, ფრეონები, ფეთქებადი ნივთიერებები, შესაფუთი მასალები და სხვ.

გამაბინძურებელ ნივთიერებათა განსაზღვრულ ჯგუფს მიეკუთვნება რადიონუკლიდები, რომლებიც წარმოადგენს მაიონიზებული გამოსხივების წყაროს და უაღრესად უარყოფითად მოქმედებს ყველა ორგანიზმსა და სასიცოცხლო პროცესებზე. რადიონუკლიდები - გარემოს გამაბინძურებელ ეკოლოგიურად საშიშ ნივთიერებათა განსაკუთრებული ჯგუფია, რომელთა გასაწეიტრალებლად მუშავდება სპეციალური რემედიაციული ღონისძიებები, ეკოლოგიური ტექნოლოგიების ჩათვლით, რომლებიც უზრუნველყოფს მათ მაქსიმალურად შემცირებას ან ეკოსისტემიდან სრულ მოცილებას [53].

ტოქსიკურ ნივთიერებათა განსაკუთრებულ ჯგუფს წარმოადგენს მძიმე მეტალების შემცველი ნაერთები, რომლებიც ყველგან არის გავრცელებული.

2.2. მძიმე მეტალები

მძიმე მეტალები წარმოადგენს განსაზღვრული სიმკვრივის ქიმიურ ელემენტებს, რომელთა სიმკვრივე 5-ჯერ მაინც აღემატება წყლისას. 35 მეტალიდან, რომელთაც ფართო გამოყენება ჰქონდა სამრეწველო მასშტაბით, 23 მძიმე ელემენტებია: Ag, As, Au, Bi, Cd, Ce, Cr, Co, Cu, Fe, Ga, Hg, Mn, Ni, Pb, Pt, Te, Th, Sb, Sn, U, V და Zn. მცირე რაოდენობით ეს ელემენტები აუცილებელია ცოცხალი ორგანიზმებისთვის, მაგრამ ნებისმიერი მათგანის მომატებული რაოდენობა მწვავე ან ქრონიკულ მოწამვლას იწვევს. მძიმე მეტალების ტოქსიკურობა გაზრდილი რაოდენობით, მიკროორგანიზმთა და მცენარეთა ზრდა-განვითარების დათრგუნვით გამოიხატება. კვებით ჯაჭვში მოხვედრისას მძიმე მეტალები სერიოზულ ზიანს აყენებს ადამიანის და ცხოველების ჯანმრთელობას. მძიმე მეტალები იწვევს ცენტრალური ნერვული სისტემის ფუნქციის მოშლას, სისხლის შედგენილობის ცვლილებას, უარყოფითად მოქმედებს ფილტვების, თირკმლების, ღვიძლის და სხვა ორგანოების ფუნქციაზე. მძიმე მეტალთა ხანგრძლივმა ზემოქმედებამ შეიძლება გამოიწვიოს კიბოს, ალერგიის, დისტროფიის, ალცჰაიმერის, პარკინსონის დაავადებები და მსგავსი ფიზიკური და ნევროლოგიური დეგენერაციული პროცესების განვითარება.

2.2.1. დარიშხანი

ერთ-ერთი ყველაზე უფრო მეტად ტოქსიკური ელემენტი, რომელსაც ადამიანი თავისი მოღვაწეობის სხვადასხვა სფეროში იყენებს, დარიშხანი ყველაზე ტოქსიკურია. ამ მეტალოიდის ყველა ნაერთი მაღალტოქსიკურია.

გარემოში დარიშხანი შეიძლება მოხვდეს: სამთამადნო სამუშაოების, სპილენძის, ტყვიისა და თუთიის წარმოებისას, ქვანახშირის წვის პროცესში და ა.შ. გარდა ამისა, დარიშხანის ოქსიდები, არსენიტები და არსენატები შედის ინსექტიციდების, დესიკანტებისა და ჰერბიციდების შემადგენლობაში. ისინი ფართოდ გამოიყენებიან მერქნის დამუშავებისას (2000 წლის მონაცემებით აშშ-ში ამ მიზნით გამოიყენეს მთელი მოხმარებული დარიშხანის 88%), სხვა-

დასხვა სახის მინის, ანტიკოროზიული შენადნობების, სარჩილავე-
ბის, საბრძოლო მასალების, აკუმულატორების დასამზადებლად.
მაღალი სისუფთავის დარიშხანი აუცილებელი კომპონენტია მზის
ბატარეებში, შუქდიოდებში, ლაზერებში, ინტეგრალურ სქემებში,
ნახევრად გამტარებში და ა.შ.

ატმოსფეროში სხვადასხვა გზით მოხვედრილი დარიშხანის ნა-
ერთები ილექება მიწისა და წყლის ზედაპირზე, სორბირდება მცე-
ნარეებზე, აღწევს მათში და ამ გზით ხვდება კვებით ჯაჭვში.

არსენიზმი ანუ დარიშხანით მოწამვლა, იშვიათი დაავადებაა,
შეინიშნება ქრონიკული მოწამვლა დარიშხნის მტვერთან ხანგრ-
ძლივი კონტაქტის დროს, რაც სშირად ლეტალურ შედეგს იწვევს
[54]. არალეტალური დოზებით მოწამვლა იწვევს ერითროციტების
ჰემოლიზს, თირკმლების და ღვიძლის დაზიანებას, კანის, ცენტრა-
ლური ნერვული სისტემის და საჭმლის მომნელებელი ტრაქტის
დაზიანებას.

დარიშხანი და მისი ნაერთები კანცეროგენურია. ისინი იწვევენ
კანის, ღვიძლის, ნაწლავების, საშარდე ბუშტის და ფილტვების და-
ზიანებას. ცნობილია, რომ დარიშხნის შემცველი ინსექტიციდების
გამოყენება ვაზის მავნებლის - ფილოქსერის წინააღმდეგ იწვევს
ვენახებში მომუშავე პერსონალის ავთვისებიანი სიმსივნით დაავა-
დებას, რომელსაც „მევენახეთა კიბო“ უწოდეს [45].

ზოგიერთი ტროპიკული წყალმცენარე მდგრადია დარიშხნის
მოქმედების მიმართ. მათ შეუძლიათ დარიშხნის შთანთქმა არსენა-
ტის სახით, მისი აღდგენა არსენიტად და ფოსფოლიპიდებთან და-
კავშირება. წარმოქმნილი კონიუგატები უჯრედულ მემბრანებში
გროვდება. თუ წყალში ფოსფატების მაღალი შემცველობაა, იგივე
წყალმცენარეები კარგავს არსენატ-იონების ტოქსიკური მოქმედე-
ბის გაუვნებელყოფის უნარს და ილუბება. ამ შემთხვევაში დარიშხა-
ნი კოვალენტურად უკავშირდება ფერმენტთა სულფჰიდრილურ
ჯგუფებს, რაც იწვევს მათი აქტიურობის არსებით ინჰიბირებას.

დარიშხნის ნაერთთა ათვისება და გარდაქმნის უნარი შესწევთ
ასევე მიცელიალური სოკოების და ბაქტერიების ზოგიერთ წარმო-
მადგენელს. მაგალითად, მეთანოგენურ ბაქტერიებს აერობულ პი-
რობებში შეუძლიათ არაორგანული დარიშხნის გარდაქმნა მეთი-

ლირებულ ნაერთებად, რომლებიც ფერმენტულად აქროლად ალ-კილარსინებად აღდგება [55].

დარიშხანით გარემოს გაბინძურების საკითხი აქტუალურია საქართველოსთვისაც, სადაც არსებობს მისი გავრცელების არაერთი ბუნებრივი თუ ანთროპოგენური წყარო. საქართველოს ტერიტორიაზე, კერძოდ, რაჭასა და ქვემო სვანეთში ათეული წლების მანძილზე მიმდინარეობდა დარიშხანის მადნების მოპოვება, გადამუშავება და დარიშხან-შემცველი პრეპარატების წარმოება [56] საბადოში მადნის გადამუშავება 1937 წელს დაიწყო. წარმოების ძირითად პროდუქტებს წარმოადგენდა უმაღლესი სისუფთავის მეტალური დარიშხანი, As_2O_5 , As_2S_3 და კალის არსენატი. აღნიშნული პროდუქცია საბჭოთა კავშირის არსებობის პერიოდში გამოიყენებოდა, როგორც სამხედრო, ასევე სამოქალაქო მიზნებით (ტყავის მრეწველობა, ქიმიური მრეწველობა, ელექტრონიკა). აღსანიშნავია, რომ ქარხანაში არსებული ტექნოლოგიური ციკლი ძალიან პრიმიტიული იყო და ითვალისწინებდა მადნის თერმულ დამუშავებას. სადღეისოდ ქარხანა, ყველა დამხმარე ნაგებობა და ინფრასტრუქტურა დანგრეულია. ქარხნის საწარმოო ნარჩენების სამარხი არ არის დაკონსერვებული. ნალექებით მოსული წყალი ხვდება ტოქსიკურ ნარჩენებში, შემდეგ ჟონავს სამარხიდან და გარემოში ვრცელდება.

ამგვარად, პრობლემას ქმნის დარიშხან-შემცველი ნარჩენები, რომლებიც ყოფილი სამთო ქიმიური ქარხნების ტერიტორიაზე ინახება და საბჭოთა პერიოდიდან არის შემორჩენილი. დარიშხანის წარმოების შედეგად დარჩენილი ტოქსიკური ნარჩენების დიდი რაოდენობა (120 000 ტონაზე მეტი ნარჩენი, 4-9% თეთრი დარიშხანის შემცველობით), რომელიც არ არის უსაფრთხოდ განთავსებული, მდინარეებისა და ნიადაგების გაბინძურების მაღალ რისკს ქმნის. სტიქიური მოვლენების (წყალდიდობები, მეწყერები, ეროზიები და სხვ.) პირობებში ეს საშიშროება შეიძლება ეკოლოგიურ კატასტროფაში გადაიზარდოს [57].

2.2.2. ტყვია

მრეწველობაში ფართოდ გამოყენებულ ერთ-ერთ მძიმე მეტალს წარმოადგენს ტყვია. მეტალური ტყვია და მისი ნაერთები: ოქსიდები, ჰალოგენიდები, კარბონატები, ქრომატები, სულფატები და სხვ. გამოიყენება მანქანათმშენებლობაში, აკუმულატორების, პიეზოელექტრული ელემენტების, რეზინების, მინის, მინანქრის, საგოზავების წარმოებაში, პოლიგრაფიაში, საღებავების, კერძოდ, ტყვიის პიგმენტების დასამზადებლად, ლაქების და საღებავების შემავსებლად, ბენზინის ანტიდეტონაციურ დანამატად, γ-გამოსხივებისგან თავდასაცავად და სხვ.

ტყვიის მსოფლიო წარმოების მოცულობა წელიწადში რამდენიმე მილიონ ტონას აღწევს. ტყვიის ემისიის ყველაზე მნიშვნელოვან წყაროებს მიეკუთვნება: გამონაბოლქვები და ჩამდინარე წყლები, რომლებიც წარმოიქმნება მეტალურგიულ, მეტალგადამამუშავებელ, მანქანათმშენებლობის, ქიმიურ, ქიმიურ-ფარმაცევტულ და ნავთობქიმიურ წარმოებებში; ტეტრაეთილტყვიის შემცველი ბენზინის გამოყენება შიგაწვის ძრავებში; მეტალის მოპოვების, ტრანსპორტირებისა და გადამამუშავების პროცესები და სხვ. ნიადაგით ტყვიით გაბინძურების მაღალი დონე დადგენილია სამხედრო მოქმედებებისა და პოლიგონების ადგილებზე [58].

ნიადაგში ტყვიის ჭარბი შემცველობა ნიადაგის მიკრობიოცენოზის ძირითად წარმომადგენელთა რაოდენობის შემცირებას იწვევს. ტყვიის ტოქსიკურობის ხარისხი რიზოსფერულ მიკროფლორისთვის დამოკიდებულია ნიადაგის ტიპზე: შავმიწა ნიადაგებზე ტოქსიკურობის ნეიტრალიზაცია უფრო სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე სხვა ტიპის ნიადაგებზე, ტყვიის ნაერთებისადმი ყველაზე მდგრადია ეუკარიოტების ზოგიერთი წარმომადგენელი - მიკროსკოპული სოკოები და პროკარიოტები.

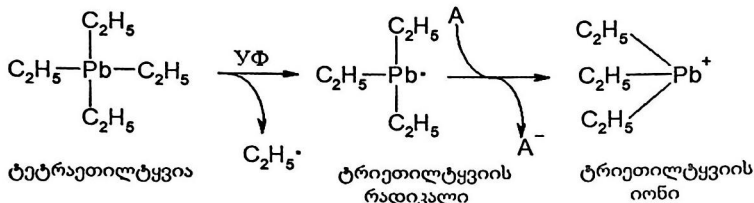
ნიადაგში ტყვიის არსებობაზე განსაკუთრებით მწვავედ რეაგირებენ მიკროორგანიზმების ისეთი ტაქსონომიური ჯგუფები, როგორცაა აქტინომიცეტები და აზოტმაფიქსირებელი ბაქტერიები. ცხადია, ეს ორგანიზმები შეიძლება გამოყენებული იქნას

ბიონდიკატორებად, რომლებიც მიუთითებს გრუნტების, ნიადაგისა და წყალსატევების ტყვიით გაბინძურების ხარისხზე.

ნიადაგში ტყვიის შემცველობა თუ 50 მგ/კგ-ზე მეტია, მისი კონცენტრაცია ბოსტნეულ კულტურებში მაქსიმალურად დასაშვებ ნორმას აჭარბებს. უნდა აღინიშნოს, რომ ტყვია ადამიანის ორგანიზმში ძირითადად კვების ჯაჭვით ხვდება (დაახლოებით 90%), მათ შორის 60-70% მცენარეული წარმოშობის პროდუქტებზე მოდის [59].

ტყვია ზომიერად ტოქსიკურია. იგი იწვევს ქრონიკულ მოწამვლას, ე. წ. „სატურნიზმს“ საკმაოდ მრავალფეროვანი კლინიკური გამოვლინებებით: აზიანებს ცენტრალურ და პერიფერიულ ნერვულ სისტემებს, ძვლის ტვინს, სისხლს, სისხლძარღვებს, თრგუნავს ცილის სინთეზს, მოქმედებს უჯრედის გენეტიკურ აპარატზე, იწვევს გონადოტოქსიკურ და ემბრიოტოქსიკურ მოქმედებას, ააქტიურებს ონკოლოგიურ პროცესებს [60].

ტყვიის ყველა ნაერთს მსგავსი თვისებები ახასიათებს, ტოქსიკურობის სხვაობა აიხსნება კუჭის წვენში, ნაწლავებში, სისხლსა და ორგანიზმის ციტოპლაზმურ სითხეში ამ ნაერთთა არათანაბარი ხსნადობით. ტყვიის ძნელად ხსნადი ნაერთები ასევე გარდაიქმნება ნაწლავებში, რის შედეგად მათი ხსნადობა და შეწოვა არსებითად მატულობს. ტყვია(II)-ის სულფატი და ტყვია(II)-ის ოქსიდი სხვა ნაერთებზე უფრო ტოქსიკურია. განსაკუთრებული ტოქსიკურობა ახასიათებს ტყვიის ნაერთებს, რომლებიც შეიცავს ტოქსიკურ ანიონს, მაგალითად, ორთოარსენატები, ქრომატები და აზიდი. ბიოციდური თვისებებით გამოირჩევა ტყვიის ორგანული ნაერთები, კერძოდ, ტეტრაეთილტყვია, რომელიც გამოიყენება ბენზინის ოქტანური რიცხვის ასამაღლებლად. აქროლადი ტეტრაეთილტყვია ჰაერში სწრაფად ვრცელდება და ულტრაიისფერი სხივების მოქმედებით იშლება რადიკალებად (ნახ. 11). ტრიეთილტყვიის რადიკალი ურთიერთმოქმედებას აქცეპტორული თვისებების მქონე სხვადასხვა ნივთიერებებთან (A).



ნახ. 11. ტეტრაეთილტყვიისგან (A-აქცეპტორი) ტრიეთილტყვიის რადიკალის და იონის წარმოქმნა

წარმოქმნილი ტრიეთილტყვიის იონი $[\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_3]^+$ მუხტის ხარჯზე ჰიდროფილურ თვისებებს ამჟღავნებს, ხოლო ეთილის ჯგუფების არსებობა იონს ლიპოფილურობას ანიჭებს, რის გამოც ტრიეთილტყვიის კატიონი ადვილად იჭრება უჯრედის მემბრანებში და უკავშირდება გოგირდის ატომებს, ცილებსა და პეპტიდებს, რითაც მათ სტრუქტურაში შეუქცევად ცვლილებებს იწვევს.

„ეთილირებული ბენზინის“ გამოყენებისას გამონაბოლქვ აირებთან ერთად გარემოში ტყვიის სხვა ნაერთებიც (ოქსიდები, ქლორიდები, ფთორიდები, ნიტრატები, სულფატები და ა.შ.) იფრქვევა მყარი ნაწილაკების სახით, რომელთა დაახლოებით 20% საავტომობილო გზის უშუალო სიახლოვეს ილექება. განსაკუთრებით უნდა აღინიშნოს გზატკეცილები, რომელთა სიახლოვეს არ არის რეკომენდებული სწრაფად მზარდი სასოფლო-სამეურნეო კულტურების პლანტაციების გაშენება. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ მადალტოქსიკურობის გამო, ეთილირებული ბენზინის გამოყენება მრავალ ქვეყანაში აკრძალულია ან შეზღუდულია.

2.2.3. ვერცხლისწყალი

ეს მძიმე მეტალი დედამიწის ქერქში არსებობს სინგურის (HgS) სახით, რომელიც შედარებით უვნებელი ნივთიერებაა. მაგრამ ბუნებრივი პროცესების და, განსაკუთრებით, ადამიანის მოღვაწეობის გამო, მსოფლიო ოკეანეში უკვე დაგროვდა 50 მილიონ ტონაზე მეტი ამ მძიმე მეტალის ტოქსიკური ნაერთი. ვერცხლისწყლის

გავრცელების ბუნებრივი წყაროებია: მთის ქანების გამოფიტვა, ვულკანების აქტიურობა. ანთროპოგენურ წყაროებს მიეკუთვნება: ქლორის ელექტროქიმიური წარმოება, ვერცხლისწყლის შემცველი ხელსაწყოების, საღებავების წარმოება და სხვ. [61].

ბუნებრივ პირობებში ვერცხლისწყლის ნაერთები, ძირითადად მდინარის დანალექებში ადსორბირდება. შემდგომ ვერცხლისწყალი დანალექებიდან ნელა თავისუფლდება და წყალში გადადის, რაც იწვევს ქრონიკული გაბინძურების წყაროს წარმოქმნას. თავდაპირველად, ვერცხლისწყალი ხვდება წყალში Hg^{2+} იონების სახით, შემდეგ ანაერობული მიკროორგანიზმების მოქმედებით სწრაფად ურთიერთმოქმედებს ორგანულ ნივთიერებებთან და წარმოქმნის მეტისმეტად ტოქსიკურ დიმეთილვერცხლისწყლისა ($[CH_3-Hg-CH_3]^+$) და მეთილვერცხლისწყლის იონებს ($[CH_3-Hg]^+$) [62]. მაღალი ხსნადობის გამო, მეთილვერცხლისწყალი სწრაფად შედის ჰიდრობიონტებში (წყალმცენარეები, მოლუსკები, თევზები და ა.შ.), საიდანაც ხვდება კვებით ჯაჭვში, საბოლოოდ ტვინის ქსოვილში გროვდება და თავის ცერებრუმის და თავის ტვინის ქერქის დაშლას იწვევს. ასეთი დაზიანების კლინიკური სიმპტომებია - გაშეშება, ორიენტაციის დაკარგვა, მხედველობის გაუარესება. დიდი დოზით ვერცხლისწყლის ნივთიერებებით მოწამვლამ შეიძლება ლეტალური შედეგიც გამოიწვიოს.

ვერცხლისწყლის ნაერთები იწვევს უჯრედული მეტაბოლიზმის ზოგიერთი საკვანძო ფერმენტის, კერძოდ, სუნთქვის პროცესში მონაწილე ციტოქრომოქსიდაზის ინაქტივაციას. გარდა ამისა, ვერცხლისწყალს შეუძლია შეუერთდეს სულფჰიდრულ და ფოსფატურ ჯგუფებს, მოახდინოს სულფჰიდრიდის ჯგუფების შემცველი ფერმენტების ინაქტივაცია და უჯრედული მემბრანების დაზიანება.

2.2.4. კადმიუმი

კადმიუმს მაღალი ტოქსიკურობა ახასიათებს. იგი ძალიან მაღალი ძვრადობით და შეღწევადობით გამოირჩევა. მეტალური კადმიუმი და მისი ნაერთები ძირითადად გამოიყენება პიგმენტების წარმოებაში, პლასტმასების (განსაკუთრებით, პოლივინილქლო-

რიდის) სტაბილიზატორებად, აკუმულატორების, ატომური რეაქტორების ღეროების, ელექტროკაბელების, ავტომანქანათა რადიატორების დასამზადებლად, ასევე შენადნობების და ფოსფოროვანი სასუქების შემადგენელ კომპონენტებად.

კადმიუმის სულფიდი (CdS) და სელენიდი (CdSe) წარმოადგენს, შესაბამისად, ყვითელი და წითელი ფერის თერმომედებე პიგმენტებს, რაც განაპირობებს მათ გამოიყენებას მინების შესაღებად, მინანქრების დასამზადებლად, კერამიკულ წარმოებაში და ა.შ.

კადმიუმის ემისიის მნიშვნელოვანი ანთროპოგენური წყაროები: მეტალურგიული წარმოება, საწვავი წიაღისეულის და ნაგვის დაწვა, თამბაქოს ბოლი, სასუქების გამოყენება, სამრეწველო ობიექტების ჩამდინარე წყლები, სასოფლო-სამეურნეო პლანტაციებიდან კადმიუმის გამორეცხვა [46]

ატმოსფეროდან კადმიუმის გამოლექვისას (მშრალ ან ტენიან მდგომარეობაში), მცენარე აქტიურად ითვისებს კადმიუმს, ამასთან კადმიუმის ნაწილმა შეიძლება შეაღწიოს ფოთლებში კუტიკულის საშუალებით. მცენარეებში კადმიუმის მაღალი კონცენტრაციით დაგროვება ხშირად იწვევს ნორმალური ზრდის დარღვევას. მაგალითად, პარკოსნების და სტაფილოს მოსავლიანობა 50%-ით მცირდება, უარესდება ნაყოფის ხარისხი, მცენარეებისგან განსხვავებით, მიცელიალური სოკოების ზოგიერთი სახეობა კადმიუმს დიდი რაოდენობით აგროვებს, რითაც ამ ელემენტის მიმართ ტოლერანტობას ავლენს.

კადმიუმი აქვეითებს საჭმელის მომწელებელი ტრაქტის ისეთ მნიშვნელოვან ფერმენტებს, როგორებიცაა ტრიფსინი და პეფსინი. გარდა ამისა, კადმიუმი კალციუმის ანტაგონისტი - კალციუმის დეფიციტის დროს კადმიუმი დიდი რაოდენობით გროვდება ორგანიზმში, კერძოდ, ძვლებში. რადგან კალციუმის მოთხოვნილება ახალგაზრდა ორგანიზმებს უფრო მაღალი აქვთ, ვიდრე მოზრდილებს, ისინი კადმიუმს დიდი რაოდენობით აგროვებენ. კადმიუმის ჭარბად დაგროვება იწვევს დაავადება იტაი-იტაის, რაც გამოიხატება ძვლებში კალციუმის შემცველობის დაქვეითებასა და მათ დარბილებაში. თირკმლებში, ღვიძლსა და ნაღვლის

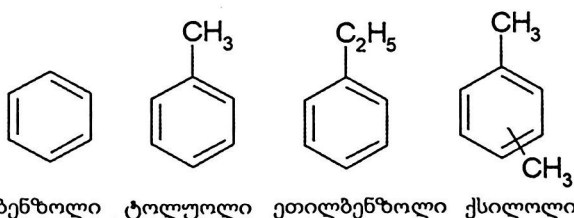
ბუმტში კადმიუმი უერთდება ცილებს და პეპტიდებს, რომელთა საშუალებით კადმიუმი მონაწილეობს ქსოვილებსა და ორგანო-ებში ნივთიერებათა ცვლაში. კადმიუმის მიმართ განსაკუთრებით მგრძობიარეა და ადვილად ზიანდება თირკმლები. ჭარბი კადმიუმი კონკურენციაში შედის თუთიასთან, იწვევს თუთიის შემცველი ფერმენტების ინჰიბირებას, რითაც ირღვევა თირკმლების ნორმალური ფუნქციონირება და ვითარდება პროტეინურია [63]. ღვიძლში კადმიუმი იწვევს სულფჰიდრილური ჯგუფების შემცველი ფერმენტული სისტემების ინჰიბირებას.

წვიმის ჭიებს ნიადაგიდან კადმიუმის სწრაფად დაგროვების უნარი შესწევთ, რის გამოც მათ ხშირად ნიადაგში კადმიუმის ბიონდიკაციის ტესტად იყენებენ.

2.3. არომატული ნახშირწყალბადები

2.3.1. ბენზოლი

მრავალი ორგანული ნაერთის ძირითად ტოქსიკურობას ბენზოლის არომატული რგოლი განაპირობებს. თვით ბენზოლი და მისი ჰომოლოგები (ნახ. 12) მაღალი დონის ტოქსიკურობით გამოირჩევა.



ნახ. 12. ბენზოლი და მისი ჰომოლოგები

ბენზოლის 90%-ზე მეტი იწარმოება ნავთობქიმიური მრეწველობით, დანარჩენი კი კოქსქიმიური წარმოებით და ბუნებრივი

აირიდან. ბენზოლის უმსხვილესი ექსპორტიორია დიდი ბრიტანეთი, რომელიც ყოველწლიურად დაახლოებით მილიონ ტონა ბენზოლს აწარმოებს.

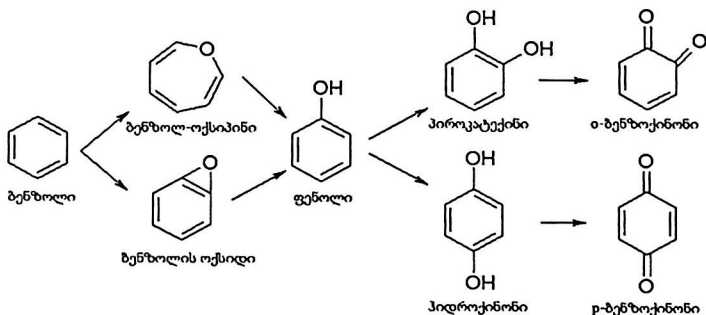
ბენზოლის და მისი ჰომოლოგების დიდი ნაწილი სხვადასხვა ნარევის სახით გამოიყენება საწვავის მრავალ სახეობაში ოქტანური რიცხვის გასაზრდელად, ძლიერ ტოქსიკური ტეტრაეთილტყვიის ნაცვლად. გარდა ამისა, ბენზოლი გამოიყენება როგორც ნედლეული სტიროლის, ციკლოჰექსანის, ეთილბენზოლის, კუმოლის, ნიტრობენზოლის, ანილინის წარმოებაში. მას ასევე იყენებენ გამხსნელად საღებავების, მელნის, რეზინების, წებოების, ლაქების ამომყვანი ნარევების, გამრეცხ საშუალებათა, წამლების, პესტიციდების წარმოებაში. უნდა აღინიშნოს, რომ ბენზოლს სიგარეტის კვამლი შეიცავს.

ბენზოლისა და მისი ჰომოლოგების გარემოში გავრცელების ძირითადი ანთროპოგენური წყაროებია:

- ნედლი ნავთობის გადამუშავება;
- ქვანახშირის გადამამუშავება;
- წარმოება, რომლის ტექნოლოგიურ პროცესებში ბენზოლი საბოლოო პროდუქტს ან სინთეზის პროცესში მონაწილე კომპონენტს წარმოადგენს;
- წიაღისეული სათბობის წვა და სხვ.

ბენზოლი ატმოსფეროში ხვდება წარმოების ან მისი გამოყენების პროცესში, საიდანაც სხვა ეკოსისტემებში ვრცელდება. ამ მიზეზით ბენზოლს სხვადასხვა რაოდენობით შეიცავს ოკეანეების, ზღვების, ტბების, წყალსაცავების, მდინარეებისა და გრუნტის წყლები.

ბენზოლი და მისი ჰომოლოგები ლეიკემიის გამომწვევი კანცეროგენური ნივთიერებებია. ბენზოლი ღვიძლში ან ფილტვებში მოხვედრისას განიცდის პირველად დაჟანგვას ციტოქრომ P450-ის შემცველი მონოოქსიგენაზით, რის შედეგად წარმოიქმნება ბენზოლ-ოქსიპინი და ბენზოლის ოქსიდი (ნახ. 13). ეს ნივთიერებები ბენზოლთან შედარებით წყალში უფრო კარგი ხსნადობით და უფრო მაღალი რეაქციუზნარიანობით ხასიათდება.



ნახ. 13. ბენზოლის გარდაქმნა ციტოქრომ P450-ის შემცველი მონოოქსიგენაზის მოქმედებით

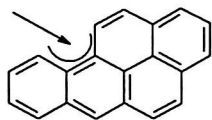
შემდეგ ეტაპზე ბენზოლის პირველადი ჟანგვის პროდუქტები ღვიძლიდან სისხლის ნაკადს გადააქვს სხვა ორგანოებში, ძვლის ტვინის ჩათვლით. ამ ქსოვილებში ბენზოლ-ოქსიპირინი და ბენზოლის ოქსიდი განიცდის შემდეგ ფერმენტულ გარდაქმნებს: თავდაპირველად ისინი აღდგებიან ფენოლამდე, რომელიც შემდგომ იჟანგება პიროკატექინად ან ჰიდროქინონად. ეს დიფენოლები, თავის მხრივ, ბენზოქინონამდე იჟანგება. დიფენოლების გარდაქმნა, ძირითადად, ძვლის ტვინის უჯრედების ფერმენტებით კატალიზდება. წარმოქმნილ ბენზოქინონებს ახასიათებს ძალიან მაღალი რეაქციისუნარიანობა. თითოეული მათგანი ოქსოჯგუფის საშუალებით იერთებს ცილას ან ნუკლეინის მჟავას, რაც იწვევს ამ ნაერთების ნორმალური ბიოლოგიური ფუნქციის მოშლას [64].

2.3.2. პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები (პან)

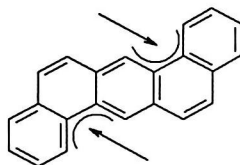
ჯანმრთელობაზე მოქმედების მიხედვით ნახშირწყალბადებიდან ყველაზე საშიშია პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები (პან), რომლებიც ცნობილია მათი კანცეროგენური, მუტაგენური და ტერატოგენური თვისებებით. პან-ები წყალში თითქმის უხსნადი მაღალტოქსიკური ნივთიერებებია [55]. მათ

გააჩნიათ დუდილის მაღალი ტემპერატურა. ქვემოთ მოცემულია ამ ჯგუფის ზოგიერთი ფართოდ გავრცელებული წარმომადგენელი (ნახ. 14):

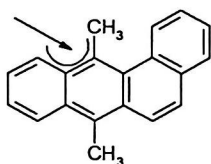
„Bay-რეგიონი“



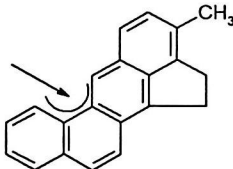
3,4-ბენზოფლურენი



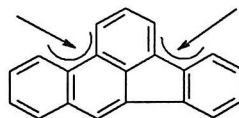
1,2,5,6-დიბენზოფლურენი



7,12-დიმეთილ-
ბენზოფლურენი



3-მეთილ-
ფლურენი



3,4-ბენზო-
ფლურენი

ნახ. 14. პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები

ყველა ამ ნაერთს, რომელთაც საკმაოდ მსგავსი სტრუქტურა ახასიათებს, გააჩნია, როგორც მინიმუმ, მოლეკულის სტრუქტურაში ერთი ჩაღრმავება, ე.წ. „Bay-რეგიონი“, რომელიც ასევე დამახასიათებელია მრავალი კანცეროგენური ნივთიერებისთვის. პან-ის წარმომადგენლები ფისების, ბითუმების, მურის, ნიადაგის ჰუმინურ კომპონენტებში, თამბაქოს კვამლში და მრავალ სხვა ობიექტში გვხვდება. პან-ები უაღრესად მდგრადია ნებისმიერ გარემოში, რაც ცოცხალ ორგანიზმებში სახიფათო კონცენტრაციით მათი დაგროვების რეალურ საშიშროებას წარმოადგენს.

უმრავლეს შემთხვევაში პან-იებისთვის დამახასიათებელია კანცეროგენური თვისებები. ორგანიზმში მოხვედრისას ფერმენტების ზემოქმედებით პან-ებისგან წარმოიქმნება ეპოქსინაერთები,

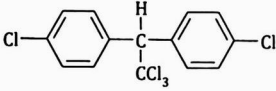
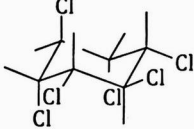
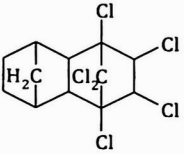
რომლებიც რეაგირებს გუანინთან. ეს ხელს უშლის დნმ-ის სინთეზს, იწვევს ტრანსკრიპციული პროცესების დარღვევას, რაც ხშირად ისეთი მუტაციების ძირითადი მიზეზია, რომლებიც კანცეროგენური დაავადების განვითარებას უწყობს ხელს.

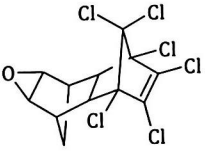
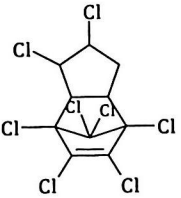
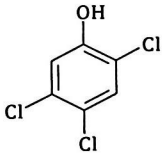
ლიტერატურაში არსებული მონაცემების თანახმად, მხოლოდ მიკროორგანიზმების და ცხოველების ძალიან უმნიშვნელო რაოდენობას შესწევს რეზისტენტობა პან-ების მიმართ, რაც აიხსნება მათი ფერმენტული სისტემის უნარით, დაშალონ პან-ები უჯრედის ჩვეულებრივ მეტაბოლიტებად. პან-ების მიმართ ადამიანის ან ცხოველური ორგანიზმების რეზისტენტობის შესახებ მონაცემები არ არსებობს [65].

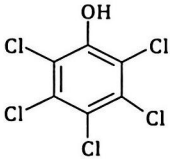
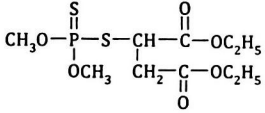
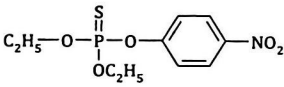
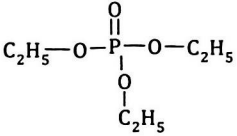
2.4. პესტიციდები

ქიმიური პრეპარატები, რომელთა გამოყენებაც მცენარეთა დაცვისათვისაა გამოიზნული, გაერთიანებულია საერთო სახელწოდებით „პესტიციდები“. გავრცელების არეალის გათვალისწინებით ისინი, პირველ რიგში, ნიადაგის გამაბინძურებლებს წარმოადგენენ. გარემოს დაცვის სააგენტოს (EPA) და ჯანმრთელობის დაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის (WHO) უკანასკნელი მონაცემებით, პესტიციდებს მიაკუთვნებენ 1000-ზე მეტ ნაერთს. ესენია: ამიდები, დიპირიდოლები, დიფენილეთერები, თიოკარბამატები, კარბამატები, კუმარინი, ნიტროფენოლები, პირაზოლები, პირეტროიდები, ტრიაზინები, ფენოლოქსიაცეტატები, შარდოვანას წარმოებულები და სხვ. ნივთიერებათა ამ კლასს ასევე მიეკუთვნება: ქლორის, ბრომის, ფთორის, ფოსფორის, დარიშხნის, კალის, ვერცხლისწყლის, სპილენძის და სხვათა შემცველი ელემენტორგანული ნაერთები. პესტიციდების წარმოება ყოველწლიურად იზრდება და, სავარაუდოდ, შეადგენს არანაკლებ მილიარდ ტონას, რაც გამოწვეულია სოფლის მეურნეობაში მათი ფართო გამოყენებით [66, 68]. პესტიციდებს ყოფენ რამდენიმე თვისების, მათ შორის, ქიმიური შედგენილობის მიხედვით. ცხრილ 3-ში მოყვანილია მოკლე ინფორმაცია ზოგიერთი ფართოდ გავრცელებული პესტიციდის შესახებ.

ცხრილი 3. ზოგიერთი ყველაზე გავრცელებული პესტიციდის სახელწოდებები, სტრუქტურული ფორმულები და დანიშნულება

დასახელება	სტრუქტურული ფორმულა და ქიმიური სახელწოდება	დანიშნულება
1	2	3
ქლორორგანული ნაერთები		
დდტ	 <p>1,1,1-ტრიქლორ-2,2-ბის (p-ქლორფენილ)ეთანი</p>	კოლოების, ტილების, ბალინჯოების და სხვა მავნე მწერების საწინააღმდეგო ინსექტიციდი
ლინდანი	 <p>1,2,3,4,5,6-ჰექსაქლორციკლოჰექსანი (γ-იზომერი)</p>	გამოყენების ფართო სპექტრის ინსექტიციდი
ალდრინი	 <p>1,2,3,4,10,10-ჰექსაქლორ-1,4,4α,5,8,8α-ჰექსჰიდრო-1,4:5,8-დიმეთანნაფტალინი</p>	ჭიანჭველების, ხოჭოების და ჭიების საწინააღმდეგო ინსექტიციდი

<p>დიალდრინი</p>	 <p>(1aR,2R,2aS,3S,6R,6aR,7S,7aS)-3,4,5,6,9,9-ჰექსაქლორ-1a,2,2a,3,6,6a,7,7a-ოქტაჰიდრო-2,7:3,6-დიმეთანანფტო[2,3-b]ოქსირენი</p>	<p>გამოყენების ფართო სპექტრის ინსექტიციდი</p>
<p>ქლორდანი</p>	 <p>ოქტაქლორ-4,7-მეთანჰიდროინდანი</p>	<p>გამოყენების ფართო სპექტრის ინსექტიციდი</p>
<p>2,4,5-ტ</p>	 <p>2,4,5-ტრიქლორფენოლი</p>	<p>დეფოლიანტი</p>

<p>პეფ</p>	 <p>2,3,4,5,6-პენტაქლოროფენოლი</p>	<p>გამოყენების ფართო სპექტრის ინსექტიციდი</p>
<p>ფოსფორორგანული ნაერთები</p>		
<p>კარბოფოსი (მელათიონი)</p>	 <p>O,O-დიეთილ-S-1,2- დიკარბეთოქსიეთილდიეთიოფოსფატი</p>	<p>ხეხილის, ბოსტნეულის, დეკორაციული მცენარეების მავნებელთა და კოლოების გამანადგურებელი ინსექტიციდი</p>
<p>თიოფოსი (პარათიონი)</p>	 <p>O,O-დიეთილ-O-p-ნიტროფენილთიოფოსფატი</p>	<p>გამოყენების ფართო სპექტრის ინსექტიციდი</p>
<p>ტრიეთილფოსფატი</p>	 <p>ტრიეთილფოსფატი</p>	<p>გამოყენების ფართო სპექტრის ინსექტიციდი</p>

პესტიციდების ფართომასშტაბიანი გამოყენების შედეგია ნიადაგის, გრუნტის წყლების, მდინარეების, ტბების, წყალსაცავების და ა.შ. გაბინძურება. პესტიციდები და მათი გარდაქმნის შუალედური პროდუქტები, კვების ჯაჭვში მოხვედრისას, მრავალგვარ დაავადებასა და პათოლოგიას იწვევს.

მოქმედების ხასიათის მიხედვით, პესტიციდები არსებითად განსხვავდება ერთმანეთისგან. ეს განსხვავებები ვლინდება სტაბილურობის, წყალში სხნადობის, აქროლადობის და მათ მიერ განხორციელებული ბიოლოგიური და ქიმიური ზემოქმედების დონეზე. პესტიციდებს, ჩვეულებრივ, აფრქვევენ პლანტაციებში ან შეაქვთ ნიადაგში. ნიადაგში პესტიციდები, ძირითადად, ანაერობულ გარდაქმნებს ექვემდებარება, რის შედეგად ქლორის ატომების ჩანაცვლება ხდება ჰიდროქსილის ჯგუფებით, თუმცა ეს იწვევს მათი ბიოლოგიური (ტოქსიკოლოგიური) აქტიურობის მნიშვნელოვან შემცირებას.

განსაკუთრებით ძლიერმოქმედი ტოქსიკანტებია ქლოროორგანული პესტიციდები, როგორებიცაა: დდტ, ლინდანი, ქლორდანი, დიელდრინი და სხვ. ისინი ადვილად ხვდებიან ადამიანის ორგანიზმში, იჭრებიან კანით ან საჭმლის მომწელებელი ტრაქტით, რის შედეგად აზიანებენ ნერვულ სისტემას.

ქლოროორგანული პესტიციდები ქლორდანი, დილდრინი და ლინდანი (იხ. ცხრ. 3) ცვლის ნერვული უჯრედების აგზნებადობას. ზემოქმედების საწყის ეტაპზე ისინი აზიანებენ ნერვულ გზებს, შემდეგ, უფრო მაღალ კონცენტრაციებზე - სენსორულ ნეირონებსაც. ამ პესტიციდებისთვის დამახასიათებელი სხვა თვისებებიდან უნდა აღინიშნოს, რომ ქლორდანი და დილდრინი წარმოადგენს მკვეთრად გამოხატული კანცეროგენური თვისებების მქონე ნივთიერებებს.

დდტ (დიქლორდიფენილტრიქლორეთანი) (იხ. ცხრ. 3) წარმოადგენს უაღრესად მკვეთრად გამოხატული ინსექტიციდური მოქმედების მქონე პრეპარატს. ეს ნივთიერება პირველად დასინთეზდა 1874 წელს, ხოლო 1930 წლიდან, როდესაც მისი ინსექტიციდური თვისებები დადგინდა, დაიწყო დდტ-ს ინტენსიური გამოყენება მალარიის გამომწვევი კოლოს წინააღმდეგ [69].

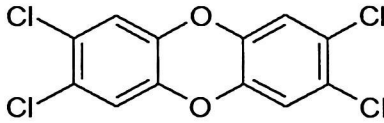
დღტ ცხიმებში კარგად იხსნება, რის გამოც ხდება ამ ინსექტიციდის დაგროვება კვების ჯაჭვში, სადაც მისი კონცენტრაცია მილიონჯერ აღემატება ბუნებრივ პირობებში არსებულს. დღტ კარგად სორბირდება თიხებზე, ასევე გროვდება ფიჭვის წიწვებთან ერთად ნეშომპალაში, სადაც ეს ინსექტიციდი იხსნება ფიჭვის წიწვის ცვილოვან ნივთიერებაში, რითაც უკიდურესად უარყოფით მოქმედებას ახდენს ეკოსისტემაზე და მრავალ ორგანიზმს ანადგურებს.

დღტ ტიპურ კონტაქტურ შხამს წარმოადგენს. იგი იოლად იჭრება კანში, იწვევს ნერვული უჯრედების მემბრანებში ნორმალური ციკლის დარღვევას, აქვეითებს Na^+ -ის ტუმბოს მგრძნობიარობას, ამიტომ ნერვული სიგნალების აღზნების შემდეგ არ ხდება ნორმალური უძრაობის პოტენციალის აღდგენა. ორგანიზმში დღტ-ს დიდი რაოდენობით მოხვედრა იწვევს კიდურების დამბლას. დედის რძის საშუალებით ამ ინსექტიციდმა შეიძლება სერიოზული ზიანი მიაყენოს ბავშვის ჯანმრთელობას, ხოლო სასქესო ჯირკვლებში შეჭრით დაარღვიოს შვილოსნობის უნარი.

ჩვეულებრივ პირობებში დღტ სრულად არ იშლება. აერობულ პირობებში დაშლის პროდუქტებია დიქლორეთილენის წარმოებულები, რომლებიც დღტ-ზე ნაკლებად ტოქსიკურია, მაგრამ მაინც ინარჩუნებს ტოქსიკურობას. ანაერობულ პირობებში წარმოიქმნება დიქლორეთანის ნაერთები, რომლებიც ადვილად გადაიქმნება ძმარმჟავას წარმოებულებად.

უნდა აღინიშნოს ფართოდ გამოყენებული ისეთი ჰერბიციდებიც, როგორცაა 2,4-დიქლორფენოქსიმარმჟავა (2,4-დ) და 2,4,5-ტრიქლორფენოქსიმარმჟავა (2,4,5-ტ) (იხ. ცხრ. 3).

ჰერბიციდების ფიზიოლოგიური მოქმედება ადამიანის ორგანიზმზე განსხვავდება მათ მცენარეებზე მოქმედების მექანიზმით: ასე მაგალითად, 2,4-დ-ს და 2,4,5-ტ-ს ჰერბიციდული თვისებები უფრო ნაკლებად ახასიათებს, ვიდრე მათ პრეპარატებში მინარევის სახით თანმხლებ დიოქსინს - 2,3,7,8-ტეტრაქლორდიბენზდიოქსინს (ტქდდ) (ნახ. 15), რომელიც უკიდურესად მაღალტოქსიკურია. ამ ნივთიერების ტოქსიკურობა 500 000-ჯერ მაღალია, ვიდრე თვით ჰერბიციდისა და თუ მისი შემცველობა ჰერბიციდში თუნდაც 0,005 მგ/კგ-ს შეადგენს, ეს კონცენტრაცია არ შეიძლება უვნებლად ჩაითვალოს. ტქდდ ნებისმიერ ბუნებრივ გარემოში განსაკუთრებულად მაღალი მდგრადობით გამოირჩევა.



ნახ. 15. დიოქსინი - 2,3,7,8-ტეტრაქლორდიბენზოდიოქსინი (ტქდდ)

ცნობილია, რომ 1971 წელს აშშ-ში ქალაქ ტაიმს ბიჩში (მისურის შტატი) იპოდრომის ნიადაგს მოასხურეს 10 000 ლ ტექნიკური ზეთი, დოღის დროს წარმოქმნილი მტვრის თავიდან ასაცილებლად. რამდენიმე დღის შემდეგ იპოდრომი მოფენილი იყო ფრინველის ლეშით, მალე მხედარი და სამი ცხენი დაავადნენ. ამას გარდა ერთ თვეში დაიღუპა 29 ცხენი, 11 კატა და 4 ძაღლი. 3 თვის შემდეგ დაავადნენ მოზრდილები და ბავშვები, რომლებიც დოღს ესწრებოდნენ. ამის მიზეზი აღმოჩნდა დიოქსინები, რომელთა კონცენტრაციამ იპოდრომის ნიადაგში 30-53 მგ/კგ-ს მიაღწია. როგორც აღმოჩნდა, ტექნიკური ზეთი წარმოადგენდა 2,4,5-ტ-ს წარმოებისას წარმოქმნილი შუალედური პროდუქტის 2,4,5-ტრიქლორფენოლის ნარჩენს. როგორც ინსექტიციდი 2,4,5-ტრიქლორფენოლი (რომელიც ცნობილია „ნარინჯისფერი აგენტის“ სახელით), ისე 2,4,5-ტ შეიძლება გარდაიქმნას ტქდდ-ად. სწორედ ეს ნივთიერება წარმოადგენდა ტაიმს ბიჩის კატასტროფის მიზეზს [68].

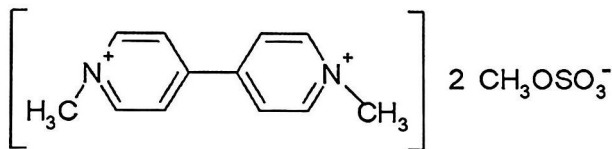
ძლიერი ფუნგიციდური, ბაქტერიციდული და ინსექტიციდური თვისებები ახასიათებს 2,3,4,5,6 - პენტაქლორფენოლს (პქფ, იხ. ცხრ. 3), რომელსაც დახურული შენობების და მერქნის დასამუშავებლად იყენებენ.

ფართოდ გამოყენებული ფოსფორორგანული პესტიციდები, რომლებიც წარმოადგენს ფოსფორმჟავას და თიოფოსფორმჟავას ეთერებს (მაგალითად, ინსექტიციდები - ალკილოფოსფატები, პარათიონი) და ასევე კარბამატები (მაგალითად, ჰერბიციდები - ბარბანი და ბეტანალი, ფუნგიციდი - მანები და სხვ.) ქიმიური აგენტებია, რომლებიც მოქმედებს ნერვულ სისტემაზე (იხ. ცხრ. 3). ისინი ახდენენ აცეტილქოლინესტერაზის აქტიური ცენტრის ბლოკირებას. ეს ფერმენტი ნერვული სინაპსიდან აცილებს ნეიროტრანსმი-

ტერს - აცეტილქოლინს. აცეტილქოლინესთერაზის ინჰიბირების შედეგად ხდება სინაპსზე ჭარბი აცეტილქოლინის დაგროვება, რაც აცეტილქოლინრეცეპტორით სიგნალის გადაცემის დარღვევას იწვევს.

მაგალითად, ალკილფოსფატები (ტრიეთილფოსფატი) წარმოადგენს აცეტილქოლინესთერაზის ძლიერ ინჰიბიტორს. ეს მოქმედებს აცეტილქოლინ-რეცეპტორით სიგნალის გადატანაზე ნერვულ დაბოლოებებზე. ფერმენტის აქტიურობის დაქვეითებით ხდება აცეტილქოლინის დაგროვება, რაც, თავის მხრივ, ამ მეტაბოლიტის დოზაზე დამოკიდებულებით, იწვევს ისეთ დაავადებათა ნიშან-თვისებათა გამოვლინებას, როგორებიცაა ნერწყვის ჭარბი გამოყოფა, ფილტვების შემუშუბა, კოლიტები, ფაღარათი, გულისრევა, მხედველობის გაუარესება, სისხლის წნევის მომატება, კუნთის სპაზმები და კრუნჩხვები, მეტყველების დარღვევა, სასუნთქი გზების დამბლა და სხვ. მსგავს კლინიკურ სურათს იძლევა ფოსფატები და კარბამატები დიდი რაოდენობით მოხვედრისას ორგანიზმში.

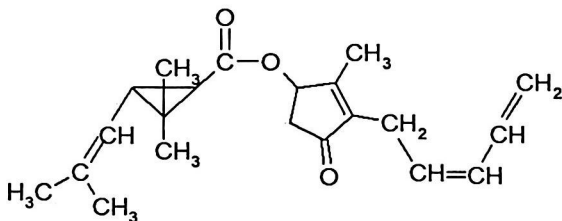
დიპირიდინები, მაგალითად, ჰერბიციდი პარაკვატი (ნახ. 16), კანზე გარეგანი შეხებითაც კი იწვევს ბებერების და წყლულების წარმოქმნას.



ნახ. 16. პესტიციდი პარაკვატი

ორგანიზმში მოხვედრისას პარაკვატი აზიანებს თირკმლებს და ღვიძლს, შემდეგ ვითარდება ფილტვების ფიბროზული ცვლილებები, რაც ლეტალურად მთავრდება. მაღალი ტოქსიკურობის გამო დიპირიდინები უაღრესად ფრთხილ მოპყრობას მოითხოვს.

ტოქსიკური თვისებები აქვს აგრეთვე ე.წ. პირეტროიდულ პესტიციდებს, რომლებიც წარმოადგენს ქრიზანთემიდან გამოყოფილ ფართოდ გავრცელებულ ინსექტიციდ პირეტრინს (ნახ. 17).



ნახ. 17. ბუნებრივი პესტიციდი პირეტრინი

პირეტრინის ინსექტიციდური თვისებების დადგენის შემდეგ დაიწყო მისი სტრუქტურის მქონე პირეტროიდების ქიმიური წარმოება. სინთეზისას სტაბილურობის გასაზრდელად მოახდინეს პირეტროიდების მოდიფიცირება. როგორც დადგინდა, სინთეზური პირეტროიდების მოქმედება ნერვულ სისტემაზე ბუნებრივის ანალოგიურია [71-73].

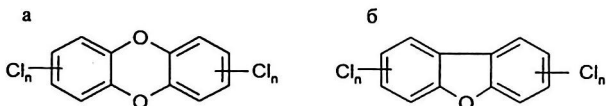
ცხოველები, ფრინველები, ნიადაგის მიკროორგანიზმები და მცენარეები აქტიურად მონაწილეობენ ნიადაგში ტოქსიკანტების წრებრუნვასა და დეგრადაციაში. სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების მიკროორგანიზმები (ბაქტერიები, სოკოები, აქტინობაქტერიები) ავლენენ უმაღლეს დეტოქსიკაციურ აქტიურობას. როგორც ბოლო წლების გამოკვლევებმა აჩვენა, მიკროორგანიზმების ანალოგიურად მცენარე ფლობს ანთროპოგენური წარმოშობის ტოქსიკურ ნივთიერებათა ასიმილირების უნარს. ამ დროს ჰიდროლიზური და ჟანგვა-აღდგენითი ფერმენტული რეაქციებით ხდება მათი დეგრადაცია, რაც გამოიხატება მათ გაუვნებელყოფაში ჩვეულებრივი უჯრედული მეტაბოლიტების და/ან ნახშირორჟანგის წარმოქმნით. ეკოლოგიური თვალსაზრისით მრავალი ტოქსიკანტის სრული დეტოქსიკაციის ეს გზა, რომელიც დაფუძნებულია მცენარეებში მათ მეტაბოლიტურ გარდაქმნასთან, ნახშირორჟანგის და წყლის წარმოქმნით, სრულიად ბუნებრივი და უვნებელია. საინტერესოა აღინიშნოს, რომ ტოქსიკანტების შიგაუჯრედული პროდუქტები მცენარეული და მიკრობული უჯრედების მიერ უჯრედისთვის საჭირო ნაერთთა კონსტრუქციულ სინთეზში გამოიყენება.

2.5. ქლორორგანული ტოქსიკანტები

ქლორორგანულ პესტიციდებში (დიოქსინები, პოლიქლორბი-ფენილები, მეთანის, ეთანის, ეთილენის და სხვა ქლორწარმოებულ-ლები) არსებული ქლორის ატომები მნიშვნელოვნად აძლიერებს მათ მედეგობას ოქსიდაზების (მჟანგავი ფერმენტული სისტემები) მოქმედების მიმართ. ეს ფერმენტები მონაწილეობს პესტიციდების ჟანგვის და დეტოქსიკაციის პროცესებში. გარდა ამისა, ქლორის შემცველი მრავალი ნივთიერება გამოირჩევა მაღალი ლიპოფილუ-რობით, რის გამოც ისინი ადვილად აღწევენ უჯრედის მემბრანულ ბარიერებში და თითქმის დაუბრკოლებლად გროვდებიან სხვადა-სხვა სტრუქტურებში, მათ შორის ბირთვშიც და შეუქცევად ცვლი-ლებებს იწვევენ [74-78].

2.5.1. დიოქსინები

განსაკუთრებით მაღალი ტოქსიკურობით გამოირჩევა დიოქსი-ნები (პოლიქლორირებული დიბენზდიოქსინები და დიბენზფუ-რანები) (ნახ. 18) [79].



ნახ. 18. ქლორირებული ბენზდიოქსინის (მარცხნივ) და ბენ-ზფურანის (მარჯვნივ) ზოგადი ფორმულები (ქლორის ატომთა სა-ერთო რიცხვი, როგორც წესი, 4-დან 8-მდე იცვლება)

დიოქსინები - მაღალტოქსიკური ნივთიერებებია, რომელთაც ახასიათებს ტერატოგენური, მუტაგენური და ძლიერი კანცერო-გენური მოქმედება [80-83]. გარემოში დიოქსინები ყოველთვის იზომერების რთული ნარევის სახითაა. დიოქსინები წარმოიქმნება ქიმიურ საწარმოთა ტექნოლოგიური პროცესების შედეგად, სადაც ხდება ქლორის, ქლორორგანული პესტიციდების, პოლიქლორ-ბენზოლების, ქლორირებული ალკანებისა და ალკენების წარმო-

ება. ქლორის ელექტროქიმიური წარმოების პროცესში ნახშირის ანოდის, ქლორის და ჰაერის ჟანგბადის ურთიერთმოქმედებით წარმოიქმნება დიოქსინი, რომელიც მინარევის სახით ყოველთვის არსებობს მიღებულ აირში, რომლითაც წყლის ქლორირება ხდება.

დიოქსინებით გარემოს გაბინძურების ერთ-ერთი მიზეზია ცე-ლულოზისა და ქაღალდის წარმოება, რომლის ერთ-ერთი საფეხურიცაა მერქნის დამუშავება მაქლორირებელი აგენტებით. ამ დროს საკმაოდ დიდი რაოდენობით წარმოიქმნება დიოქსინები. ასეთივე პროცესია ქაღალდის წარმოებისას ქლორის ან მისი შემცველი პრე-პარატების მათეთრებელ აგენტებად გამოყენება.

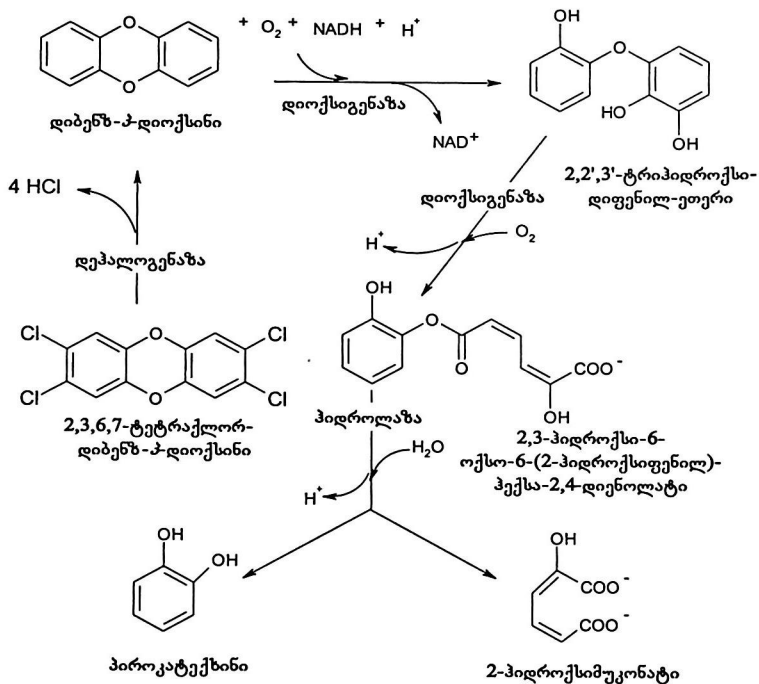
ატმოსფეროში დიოქსინების ემისიის ერთ-ერთ მიზეზს ასევე წარმოადგენს მაღალტემპერატურული ქიმიური პროცესები, რომლებშიც ქლორის შემცველი ორგანული ან/და არაორგანული ნაერთები მონაწილეობს. ასეთ პროცესებს მიეკუთვნება, მაგალითად, მყარი კომუნალური ნარჩენების დაწვა. დიოქსინის საკმაოდ აქტიური წყაროა საავტომობილო ტრანსპორტი, რადგან საწვავს უმატებენ 1,2-დიქლორეთანს, ეთილირებულ ბენზინზე მომუშავე ძრავის შიდა ნაწილზე ტყვიის ნაერთების დალექვის შესამცირებლად.

დიოქსინებს ახასიათებს უძლიერესი კანცეროგენური ეფექტი [79-85]. კანზე მოხვედრისას იწვევს მძიმე დაზიანებებს და დიდხანს მოუშუშებელ იარებს. დიოქსინები აზიანებს ენდოკრინულ სისტემას, არღვევს სასქესო ჯირკვლების ფუნქციას, გამანადგურებლად მოქმედებს ემბრიონის განვითარებაზე. დიოქსინების მოქმედებით ორგანიზმში ვითარდება იმუნოდეფიციტი, რის გამოც იზრდება ინფექციური დაავადებების ამთვისებლობა.

დიოქსინები, ისევე როგორც ბევრი სხვა ქლორორგანული ნაერთი, გარემოში ძალიან მაღალი ქიმიური სტაბილურობით ხასიათდება და ბიოდეგრადაციულ პროცესებს ძნელად ექვემდებარება.

დიოქსინების მინერალიზაცია შესაძლებელია მხოლოდ განსაკუთრებულ პირობებში, ანაერობულ და აერობული მიკროორგანიზმების ერთობლივი თანმიმდევრული მოქმედების შედეგად. აღმოჩენილია ბაქტერია, რომელსაც შეუძლია ამ ტოქსიკანტების დაშლა. ეს არის ანაერობული ბაქტერია *Dehalococcus sp.*, რომელიც აღდგენითი დეჰალოგენირებით დიოქსინის მოლეკულიდან ამე-ვებს ქლორის ატომებს. ამ დროს წარმოიქმნება დიბენზ-პ-დიოქ-

სინი, რომელიც შემდგომში ფერმენტების საშუალებით გარდაქმნება - არომატული ბირთვი იხლიჩება და სტანდარტული უჯრედული მეტაბოლიტები წარმოიქმნება (ნახ. 19). ეუკარიოტულ ორგანიზმებში დიოქსინებზე მოქმედების ეფექტი გამოქვლავანდა ბაზიდიალური სოკოების შტამში, *Phanerochacte srysosporium*-ის სახეობის წარმომადგენლებში.

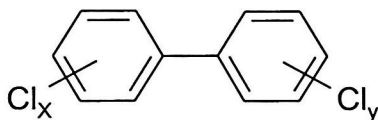


ნახ. 19. 2,3,7,8-ტეტრაქლორდიბენზ-*p*-დიოქსინის მიკრობიოლოგიური ბიოდეგრადაცია დეჰალოგენაზების, დიოქსიგენაზების და ჰიდროლაზების თანმიმდევრული მოქმედებით

დიოქსინების მიმართ მაღალი მგრძნობიარობით გამოირჩევა ნიადაგის მიცელიალური სოკოს და აქტინობაქტერიების ზოგიერთი წარმომადგენელი. ნიადაგში ამ მიკროორგანიზმთა არარსებობა შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც დიოქსინებით გაბინძურების ბიონდიკაციის ერთ-ერთ ნიშან-თვისება.

2.5.2. პოლიქლორირებული ბიფენილები

დიოქსინებთან ერთად განსაკუთრებით მაღალი ტოქსიკურობით გამოირჩევა პოლიქლორირებული ბიფენილები, რომლებიც აერთიანებს 20-ზე მეტ ძლიერ ტოქსიკურ ნივთიერებას (ნახ. 20) [78, 82]. ყველა პოლიქლორირებული ბიფენილი ხასიათდება მაღალი თერმომდეგობით, არ იწვის, რის გამოც იყენებენ ელექტროტექნიკაში, პოლიგრაფიაში, ქაღალდის, მელნის და საღებავების წარმოებაში. აალების საწინააღმდეგო დანამატების სახით გამოიყენება ტრანსფორმატორებში და ტექნიკურ ზეთებში, სხვადასხვა სითბოს გადამცემ ხსნარებში, პლასტმასებში, შესაფუთ მასალებში.



ნახ. 20. პოლიქლორირებული ბიფენილების ზოგადი ფორმულა

პოლიქლორირებული ბიფენილები წყალში პრაქტიკულად უხსნადია და ხასიათდება დუღილის მაღალი ტემპერატურით [84]. ამის მიუხედავად, ეს ნაერთები გარემოში დიდი რაოდენობითაა გავრცელებული. ბუნებრივ პირობებში ამ სტრუქტურათა განსაკუთრებულად მაღალი მდგრადობის გამო, პოლიქლორირებული ბიფენილები უცვლელი სახით დიდხანს რჩება, მაღალი ლიპოფილურობის გამო ადვილად გროვდება მცენარეულ და ცხოველურ ქსოვილებში, საიდანაც ხვდება კვების ჯაჭვში და დიდ საშიშროებას უქმნის ადამიანის ჯანმრთელობას.

პოლიქლორირებული ბიფენილების მოლეკულების მდგრადობას მნიშვნელოვნად განაპირობებს ჰალოგენის ატომები. მოლე-

კულებში საერთო მასის 30%-ზე ნაკლები რაოდენობით ჰალოგენის შემცველობის შემთხვევაში ბიფენილები ნაკლებად მდგრადია, შედარებით მარტივად ბიოდეგრადირებადი და ორგანიზმიდან მათი გამოძევებაც უფრო იოლად ხდება, ვიდრე იმ ბიფენოლებისა, რომელთა მოლეკულებშიც ქლორი საერთო მასის არანაკლებ 60%-ს შეადგენს.

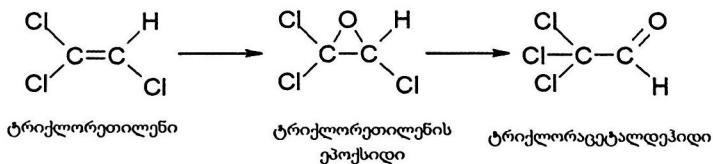
2.5.3. ქლორირებული ალკანები და ალკენები

ნახშირწყალბადთა ტოქსიკური წარმოებულებიდან უნდა აღინიშნოს ქლორჩანაცვლებული ალკანები და ალკენები, როგორებიცაა: ტეტრაქლორმეთანი CCl_4 , დიქლორმეთანი CH_2Cl_2 , ქლოროფორმი CHCl_3 , დიქლორეთანი $\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$, ვინილქლორიდი $\text{CH}_2=\text{CHCl}$, ტრიქლორეთილენი $\text{CCl}_2=\text{CHCl}$, ტეტრაქლორეთილენი $\text{CCl}_2=\text{CCl}_2$ და სხვ. ეს ნაერთები დიდი რაოდენობით გამოიყენება ორგანულ სინთეზში, როგორც გამხსნელად, ისე რეაგენტებად. ქლორალკანები და ქლორალკენები ადვილად აქროლადი ნაერთებია, მათი წყალში ხსნადობა და ძვრადობა შესაბამის ნახშირწყალბადებზე მაღალია.

ნიადაგში ტრიქლორეთილენი უცვლელი რჩება რამდენიმე თვის განმავლობაში. დადგენილია, რომ ალვის ხე, ვერხვი, ტირიფი, სამყურა, იონჯა, ჭვავი, სორგო და ზოგიერთი სხვა მცენარე აქტიურად შთანთქმავს ტრიქლორეთილენს და სხვა ქლორირებულ ალიფატურ ნახშირწყალბადებს, მცენარეში მიმდინარე მეტაბოლური გარაქმნების შედეგად ტოქსიკანტის გარკვეული რაოდენობა მინერალიზაციას განიცდის [78].

ტრიქლორეთილენი (ტქე) ორგანიზმზე ტოქსიკური ზემოქმედებით ტეტრაქლორმეთანის მსგავსია. ციტოქრომ P450-ის შემცველი მონოოქსიგენაზის საშუალებით განხორციელებული გარდაქმნის შედეგად ტრიქლორეთილენი ტრანსფორმირდება ეპოქსიდურ ნაერთად, ხოლო შემდეგ ტრიქლორაცეტალდეჰიდად. ამ უკანასკნელისგან ორგანიზმში შემდგომი მეტაბოლიტური გარდაქმნებით წარმოიქმნება ტრიქლორმმარმეჟა და ტრიქლორე-

თანოლი (ნახ. 21). ტრიქლორალდეჰიდს ახასიათებს მუტაგენური თვისებები, რაც გამოიხატება დნმ-ის მოლეკულაში არაზუნებრივ სტრუქტურულ ცვლილებებში.



ნახ. 21. ტრიქლორეთილენის ტრანსფორმაცია ცხოველურ ორგანიზმში ციტოქრომ P450-ის შემცველი მონოოქსიგენაზის ზემოქმედებით.

გამოთვლილია, რომ წარმოებული მთელი ტქე-ის დაახლოებით 90%, საბოლოოდ, გარემოში ხვდება, ამასთან, ძირითადი ნაწილი ჰაერშია, დანარჩენი კი მყარ ნარჩენებსა და ჩამდინარე წყლებში. ტქე განსაკუთრებით მდგრადია აერობულ პირობებში [87]. ზღვის წყალში მისი ნახევრად დაშლის პერიოდი შეადგენს 90 კვირას, მტკნარ წყალში - 2,5-დან 6 წლამდე. ანაერობული ბაქტერიების მოქმედებით ტქე-ს ნახევრად დაშლის პერიოდი 40 დღემდე მცირდება (ამასთან, ტქე-ს ნაწილი CO_2 -ის წარმოქმნით იშლება).

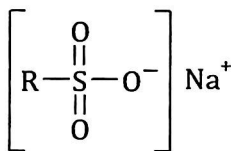
დადგენილია პოლივინილქლორიდის მონომერის - ვინილქლორიდის კანცეროგენური თვისებები [63, 69-71]. ეს პოლიმერი განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება მრეწველობაში. მისგან აწარმოებენ ლინოლიუმს, გარეცხვად შპალერებს, ხელოვნურ ტყავს, პლასტიკურ ბოთლებს და მრავალ სხვა პოლიმერულ ნაკეთობას.

ტოქსიკურ ნაერთთა ზემოთ მოტანილი სია და მათი მოქმედება ადამიანის ორგანიზმზე, ანთროპოგენური სპექტრის გარემოს გამაზიანებლებს ტოქსიკურობის და ადამიანის ორგანიზმზე ზემოქმედების მხოლოდ მცირე ნაწილია.

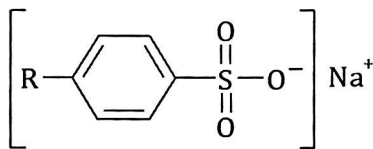
2.6. ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები

წყლის დაბინძურებასთან დაკავშირებულ დიდ პრობლემას ქმნის ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები (ზან) ანუ დეტერგენტები (ტენზიდები). მათ იყენებენ როგორც სარეცხ საშუალებებს, რომლებიც აქვეითებს წყლის ზედაპირულ დაჭიმულობას, რასაც თან ახლავს ქაფწარმოქმნა. ზან-ები მოიცავს ორგანულ ნაერთთა დიდ ჯგუფს, ისინი მიეკუთვნებიან სხვადასხვა ქიმიურ კლასს, რომელთა მოლეკულებიც ჰიდროფილურ და ჰიდროფობურ უბნებს შეიცავს.

დეტერგენტებს ძირითადად სამ ჯგუფად - ანიონურ, კატიონურ და ნეიტრალურ ზან-ებად ყოფენ. მაგალითად, ანიონურ ზან-ებს მიეკუთვნება ალკილსულფონმჟავები, რომლებიც ჰიდროფილურ ჯგუფს გოგირდმჟავას სახით შეიცავს (ნახ. 22).



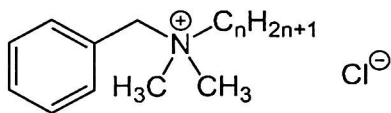
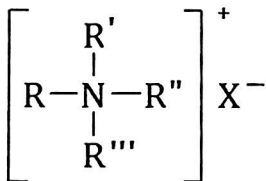
ალკილსულფონის მჟავა



ალკილბენზოლსულფონის მჟავა

ნახ. 22. ალკილსულფონმჟავები

კატიონურ ზანებს მიეკუთვნება ალკილამონიუმის ნაერთები, რომლებიც ჰიდროფილური ნაწილის სახით მეოთხეულ ამონიუმის ჯგუფს შეიცავს (ნახ. 23).



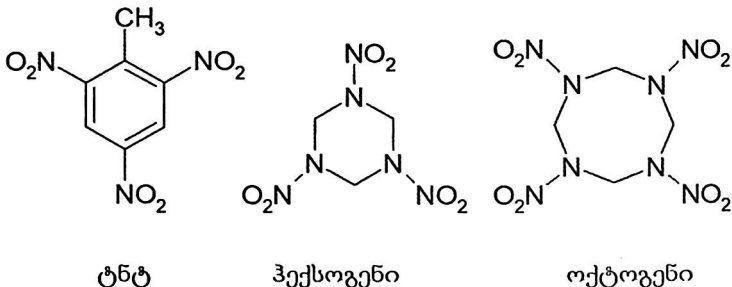
$n = 8, 10, 12, 14, 16, 18$

ნახ. 23. ალკილამონიუმის ზან-ის ზოგადი ფორმულა და მისი მაგალითი - ბენზალკონიუმის ქლორიდი

ზან-ებზე მზარდმა მოთხოვნილებამ სამრეწველო წარმოებებში, ასევე ყოფაცხოვრებაში ინტენსიურმა გამოყენებამ, პირველ რიგში, რეცხვის პროცესში, გამოიწვია ქაფის რაოდენობრივი მატება მიწისქვეშა წყალში, მდინარეების კალაპოტებსა და წყალსაცავებში. ქაფი აფერხებს ნაოსნობას, ხოლო ზან-ების მაღალი ტოქსიკურობა იწვევს თევზების მასობრივ დაღუპვას. ქიმიური სინთეზით მიღებული ზან-ების გამოყენების უარყოფითმა შედეგმა გამოიწვია ბიოდეგრადირებადი დეტერგენტების გამოყენება, რომლებიც ბიოლოგიური ფაქტორების მოქმედებით იშლება. შედარებით ადვილად დაშლად ზან-ებს მიეკუთვნება ტენზიტები არაგანტოტვილი ჯაჭვით, როგორცაა, მაგალითად, არაიონური ხასიათის დეტერგენტები და ალკილბენზსულფატები. ასეთი ზან-ები ასევე ხასიათდება ადამიანებისა და თევზებისათვის დაბალი ტოქსიკურობით. მათ მოლეკულებში ჯაჭვების ბიოტური დაშლა ხორციელდება β -დაჟანგვის ხარჯზე, ე.ი. ძმარმჟავას ნაშთების მოხლეჩით.

2.7 ფეთქებადი ნივთიერებები

ფეთქებად ნივთიერებად ხშირად იყენებენ ნიტროჯგუფის შემცველ ორგანულ ნაერთებს. მათ შორის ყველაზე გავრცელებულია: 2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (ტნტ), ნიტროგლიცერინი, ჰექსოგენი - 1,3,5-ტრინიტრო-1,3,5-ტრიაზინი (რომელიც ასევე ცნობილია როგორც ციკლონიტი, ან ბრიტანული კოდური დასახელებით - RDX), ოქტოგენი (ოქტაჰიდრო -1,3,5,7-ტეტრანიტრო-1,3,5,7-ტეტრაზოცინი (HMX)) და სხვ. (ნახ. 23). ნიტროჯგუფების შემცველობის გამო ეს ნაერთები წარმოადგენს ნიადაგების და გრუნტის წყლების (სამხედრო მოქმედების ადგილები, პოლიგონები, სამხედრო ქარხნები და საწყობები და ა.შ.) მაღალტოქსიკურ გამაბინძურებლებს და ამიტომ აუცილებლად საჭიროებს რემედიაციას.



ნახ. 24. ფეთქებადი ნიტრონაერთები.

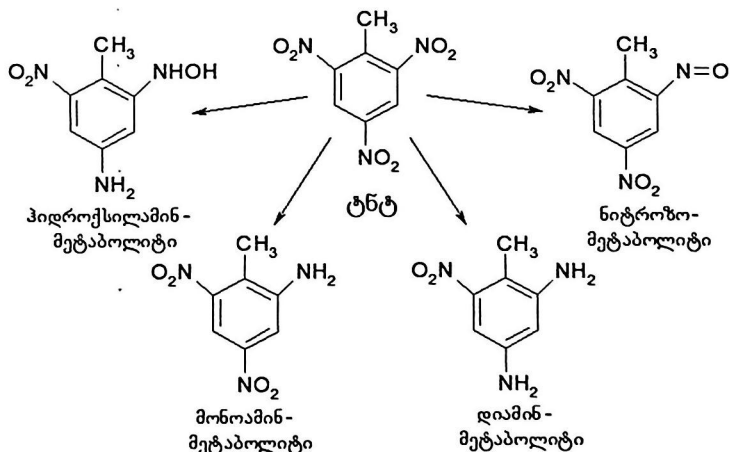
2.7.1 2,4,6-ტრინიტროტოლუოლი (ტნტ)

ფეთქებად ნიტრონაერთებს შორის ყველაზე ხშირად მიზნებისთვის იყენებენ ტნტ-ს, თუმცა სხვა ნიტრონაერთები ხასიათდება არანაკლები ფეთქებადუნარიანობით. მაგალითად, ტნტ-თან შედარებით, ჰექსოგენს ახასიათებს 1,5-ჯერ მეტი ფეთქებადი უნარი. ჰექსოგენის საფუძველზე ამზადებენ „კლასტიკურ ბომბებს“. რაც შეეხება ოქტოგენს, ეს ნაერთი, ძირითადად გამოიყენება ჯავშნის საწინააღმდეგო სპეციალური ბომბის დასამზადებლად, ვიდრე სხვა ფეთქებადი ნივთიერებები, ამიტომ ოქტოგენს იყენებენ სწრაფმსროლი მცირეყალიბიანი ქვემეხების ჭურვებში, ასევე რაკეტული საწვავის კომპონენტად. უნდა აღინიშნოს, რომ ნიტროჯგუფების არსებობა ზემოხსენებულ ნაერთებს ანიჭებს არამარტო ფეთქებადუნარიანობას, არამედ მაღალ ტოქსიკურ თვისებებსაც.

ტნტ გარემოს უაღრესად საშიში გამაბინძურებელი აგენტია. იგი გამოიყენება, როგორც ფეთქებადი ნივთიერება და წარმოადგენს შუალედ პროდუქტს საღებავების და ფოტოგრაფიული მასალების წარმოებაში. ტნტ-ს წარმოება და საომარი მიზნებით გამოყენება გარემოში მისი დიდი რაოდენობით გავრცელებას იწვევს. ეს ერთ-ერთი ყველაზე ტოქსიკური ფეთქებადი ნივთიერებაა სამხედრო არსენალში. ტნტ-ს გამოყენებამ გააბინძურა ათასობით ჰექტარი ნაომარი მიწა. ნიადაგში ტნტ-ს გადაადგილება შეზღუდულია ნიადაგის ნაწილაკების მიერ მისი აქტიური ადსორბციით.

ადამიანის ორგანიზმში ტნტ აღწევს საჭმლის მომნებელი ტრაქტის, კანის, ფილტვების საშუალებით და ნაწილდება, უპირველეს ყოვლისა, ღვიძლში, თირკმელბსა და ცხიმოვან ქსოვილში, რითაც ქრონიკულ დაავადებებს ასტიმულირებს [88].

ცოცხალ ორგანიზმებში ტნტ ნიტროჯგუფების აღდგენით ნელა ტრანსფორმირდება, რაც იწვევს ჰიდროქსი-წარმოებულების, ჰიდროქსილამინიტროტოლოლების, ამინდინიტროტოლოლებისა და დიამინიტროტოლოლების წარმოქმნას (ნახ. 25). გარდა ამისა, შესაძლებელია მოხდეს მეთილის ჯგუფის დაჟანგვა და ბენზილის სპირტის და ბენზოის მჟავას ნიტრო- და ამინწარმოებულების ფორმირება. ამ შუალედური მეტაბოლიტებიდან ზოგიერთი გლუკურონის მჟავას უკავშირდება. სწორედ ნიტროზო- და ჰიდროქსილამინის ჯგუფების წარმოქმნა წარმოადგენს იმ ფაქტორს, რომელიც წინასწარ განსაზღვრავს ცოცხალ ორგანიზმებზე ტნტ-ის ტოქსიკურ ზემოქმედებას [89]. ეს იმით არის გამოწვეული, რომ აღნიშნული ჯგუფები უკავშირდება უჯრედის ბიოპოლიმერებს, მათ შორის, ნუკლეინის მჟავებს, რაც მეტაბოლური პოტენციალის შემცირებას და ქიმიურ მუტაგენეზს იწვევს [90].



ნახ. 25. ცხოველურ ორგანიზმებში ტნტ-ის გარდაქმნის გზები

ნიტროზ- და ჰიდროქსილამინჯგუფები უკავშირდება უჯრედის ბიოპოლიმერებს, მათ შორის ნუკლეინის მჟავებს, რაც იწვევს ქიმიურ მუტაგენეზს. ამიტომ ტნტ-ს გარდაქმნის ეს შუალედური პროდუქტები უფრო ტოქსიკურია, ვიდრე თავით ტნტ.

ნიტროჯგუფები სრული აღდგენა არსებითად აქვეითებს ტნტ-ის მუტაგენურ პოტენციალს. ეს პროცესი მიმდინარეობს როგორც აბიოტურად, ისე ფერმენტული გზით [91]. ტნტ-ს დეგრადაცია მიკროორგანიზმებში შემდეგი ორი გზით ხორციელდება:

- აზოტის მოცილებით ნიტრიტის სახით და ნიტრიტრედუქტაზით ნიტრიტის შემდგომი აღდგენით ამონიუმად (აერობულ პირობებში);
- ბაქტერიული ნიტრორედუქტაზით ნიტროჯგუფების აღდგენით და ამინწარმოებულების შემდგომი აერობული დეგრადაციით (ანაერობულ პირობებში).

Pseudomonas-ის გვარის ცალკეულ შტამებს და მიცელიალური სოკოების ზოგიერთ წარმომადგენელს შეუძლია ტნტ-ის აზოტის საკვებად გამოყენება. ასე, მაგალითად, შტამი *Pseudomonas* sp. JLR11 ახდენს ტნტ-ის თითქმის 85% აზოტის ასიმილაციას და ამ ელემენტის ჩართვას უჯრედული მეტაბოლიტების შედგენილობაში. ეს თვალსაჩინო მაგალითია იმისა, თუ ატომი, რომელიც ქსენობიოტიკის ტოქსიკურ სტრუქტურას ქმნის, მიკროორგანიზმის ნორმალური ცხოველმოქმედების პროცესში როგორ შეიძლება გამოყენებულ იქნას საშენ მასალად შიგაუჯრედული ნაერთების სინთეზში.

Phanerochaete chrysosporium და ზოგიერთი სხვა ბაზიდიალური სოკო ახდენს ტნტ-ის მინერალიზაციას: ტნტ-ის აღდგენილი მეტაბოლიტები განსაკუთრებით ეფექტიანად დეგრადირდება ბაზიდიალური სოკოების ლიგნინლიზური ფერმენტებით.

ტნტ-ის შთანთქმის და ნაწილობრივი გარდაქმნის უნარი ასევე დამახასიათებელია ზოგიერთი მცენარისთვის.

წყლის მცენარე (*Myriophyllum aquaticum*) და ზღვის წყალმცენარე *Nitella* sp. გამოიყენება ტნტ-ით გაბინძურებული ნიადაგისა და წყლის ფიტორემედიაციისთვის. ფერმენტი ნიტრორედუქტაზა, რომელიც უშუალოდ მონაწილეობს ტნტ-ს ნიტროჯგუფების აღდგენაში, გამოვლენილია ზღვის სხვა წყალმცენარეებშიც, ერთლებნიან და ორლებნიან მცენარეებშიც [92].

ტრანსგენურმა თამბაქომ (*Nicotiana tabacum*) რომელშიც ექსპრესირებულია ბაქტერიული ნიტრორედუქტაზის გენი, შეიძინა ტნტ-ს დეგრადაციის უნარი იმ რაოდენობით, რაც საჭიროა სამხედრო პოლიგონების ძლიერ გაბინძურებული ნიადაგების გასასუფთავებლად [92].

2.10. ტოქსიკური აირები

ატმოსფეროში არსებული მრავალი აირადი ნივთიერება მაღალი კონცენტრაციებით შეიძლება წარმოადგენდეს საშიშ ტოქსიკანტებს, რითაც სერიოზული ზიანის მიყენება შეუძლია გარემოსთვის. ასეთ აირებს მიეკუთვნება ნახშირბადის, აზოტის, გოგირდის ოქსიდები, გოგირდწყალბადი, მეთანი, ფთორქლორნახშირწყალბადები და სხვ.

2.10.1. გოგირდის დიოქსიდი

გოგირდის დიოქსიდი (გოგირდოვანი ანჰიდრიდი) SO_2 - მკვეთრი სუნის მქონე, უფერო აირია. მისი მოლეკულური მასაა 64,066. სუფთა გოგირდოვანი ანჰიდრიდის სიმკვრივე - $0^{\circ}C$ ტემპერატურასა და 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევაზე შეადგენს 2,9267 კგ/მ³-ს, სითბოტევადობა - 39,8 ჯ/(მოლ · K-ს); ლღობის ტემპერატურაა $-75,46^{\circ}C$; დუღილის ტემპერატურა შეადგენს $10,06^{\circ}C$ -ს, კრიტიკული ტემპერატურა $157,5^{\circ}C$ -ს, კრიტიკული წნევა - 7,88 მპა-ს. სუფთა გოგირდოვანი ანჰიდრიდი სითხედ კონდენსირდება $10,8^{\circ}C$ ტემპერატურასა და 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევაზე. თხევადი SO_2 -ის საშუალო კუთრი სითბოტევადობა $-20,6^{\circ}C$ - $+9,8^{\circ}C$ ტემპერატურის ინტერვალში ტოლია 20,8 ჯ/(მოლ · K); $-72,5^{\circ}C$ ტემპერატურაზე SO_2 მყარ მდგომარეობაში გადადის.

გოგირდის დიოქსიდი ძლიერ ტოქსიკურად მოქმედებს ორგანიზმზე. გარდა ამისა, SO_2 -ის რეაქციისუნარიანობა CO_2 -ზე მნიშვნელოვნად მაღალია.

SO_2 -ის ბუნებრივ წყაროებს, პირველ რიგში, მიეკუთვნება: ვულკანები, ტყის, ხანძრები, ზღვის ქაფი და გოგირდმემცველ ნაერთთა მიკრობიოლოგიური გარდაქმნები.

ანთროპოგენური გოგირდის დიოქსიდი წარმოიქმნება მეტალურგიულ ქარხნებში, გოგირდშემცველი მადნის გადამუშავებისას, ნახშირის და ნავთობის წვის პროცესში. ანთროპოგენური წარმოშობის SO_2 -ის საერთო რაოდენობა ბუნებაში არსებული გოგირდის დიოქსიდის საერთო რაოდენობის 90%-ზე მეტს შეადგენს.

ჰაერში მოხვედრის შემდეგ, გოგირდის დიოქსიდი დიდხანს არ ყოვნდება - რამდენიმე საათიდან (ნესტიან ჰაერში) სამ კვირამდე (მშრალ და სუფთა ჰაერში). როდესაც SO_2 ერევა ჰაერს ტენის წვეთებთან ერთად, მიმდინარეობს ქიმიური, ფოტოქიმიური და სხვა რეაქციები, რის შედეგადაც წარმოიქმნება მეორეული გამაბინძურებელი - გოგირდმჟავა, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის გოგირდის დიოქსიდის ეკოლოგიურ საშიშროებას. გარდა ამისა, გოგირდის დიოქსიდი მოქმედებს რა შეწონილ ნაწილაკებთან, წარმოქმნის გოგირდის მარილებს, რომლებიც ილექება ადამიანის ფილტვებში, იწვევს ქსოვილების დაშლას და ამით გამოწვეულ სერიოზულ დაავადებებს. გოგირდის დიოქსიდის შედარებით მცირე რაოდენობის შემცველი ჰაერის შესუნთქვა იწვევს ადამიანის ზედა სასუნთქი გზების ანთებას. ამასთან, ფილტვების დაზიანება ვლინდება სასუნთქ გზებში SO_2 -ის მოხვედრიდან 1-2 დღის შემდეგ [14].

გოგირდის დიოქსიდის ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაცია (ზდკ) სამრეწველო ნაგებობათა სამუშაო ზონის ჰაერში შეადგენს 10 მგ/მ^3 -ს, ქალაქის ატმოსფერულ ჰაერში მაქსიმალური ერთჯერადი ზდკ არის $0,5 \text{ მგ/მ}^3$, ხოლო საშუალო დღეღამური ზდკ - $0,05 \text{ მგ/მ}^3$ -ს.

როგორც პირველ თავში იყო ნაჩვენები, გოგირდის დიოქსიდი, აზოტის ოქსიდებთან ერთად, მჟავა წვიმების წარმოქმნის ერთ-ერთი მიზეზია.

2.10.2. აზოტის ოქსიდები

ატმოსფეროს აქტიურ გამაბინძურებლებს წარმოადგენს აზოტის ოქსიდები (ზოგადი ფორმულა - NO_x). ბუნებაში აზოტის ოქსიდების წარმოქმნა დაკავშირებულია ელექტრულ განმუხტვასთან, რომლის დროსაც წარმოიქმნება NO , შემდეგ კი NO_2 . აზოტის დიოქ-

სიდი გამოიყოფა (მცირე რაოდენობით) სილოსის ფერმენტაციის პროცესშიც.

ნიადაგში ჟანგბადის დეფიციტის დროს მიმდინარეობს ნიტრატების მიკრობიოლოგიური დენიტრიფიკაცია:



ნიტრატების სიჭარბისას NO_3^- იონი აბრკოლებს NO_2^- -ს გარდაქმნას N_2O -სა და N_2 -ად.

ანთროპოგენური წარმოშობის აზოტის ოქსიდები (აღინიშნება, როგორც NO_x), ძირითადად, მონოოქსიდსა (NO) და დიოქსიდს (NO_2) წარმოადგენს, რომლებიც წარმოიქმნება წვის პროცესში, როდესაც ტემპერატურა 1000°C -ს აღემატება. აზოტის ოქსიდები გამოიყოფა ასევე ნიტრირების პროცესში, სუპერფოსფატის წარმოებისას, აზოტმჟავათი მეტალების გაწმენდისას, ფეთქებად ნივთიერებათა დამზადებისას და ა. შ. NO_x -ით ატმოსფეროს გაბინძურების ძირითადი წყაროა საავტომობილო ტრანსპორტი. აზოტის ოქსიდებით ანთროპოგენური გაბინძურება კრიტიკულ ზღვარს მჭიდროდ დასახლებულ ქალაქებში აღწევს.

აზოტის მონოოქსიდი (NO) - უფერო აირია, რომელიც წარმოიქმნება ჟანგბადთან აზოტის პირდაპირი შეერთებით, მისი მოლეკულური მასაა 30,008, სიმკვრივე 0°C ტემპერატურასა და 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევაზე შეადგენს $1,3402 \text{ კგ/მ}^3$ -ს, სითბოტევადობა - $29,86 \text{ ჯ}/(\text{მოლ} \cdot \text{K})$ -ს, ლღობის ტემპერატურა $-163,7^\circ\text{C}$ -ს, დუღილის ტემპერატურა $-151,6^\circ\text{C}$ -ს, კრიტიკული ტემპერატურა -93°C -ს, კრიტიკული წნევა - $6,48 \text{ მპა}$ -ს.

NO , როგორც ჰაერის დამაბინძურებელი, ძლიერ მომწამლავი ნივთიერებაა. იგი მოქმედებს ცენტრალურ ნერვულ სისტემაზე და აზიანებს ფილტვებს, რთულ შემთხვევებში იწვევს ფილტვების შესუპებას და აქვეითებს სისხლის წნევას.

აზოტის მონოოქსიდი და დიოქსიდი მონაწილეობს მთელ რიგ ფოტოქიმიურ რეაქციებში, რითაც ხელს უწყობს ოზონის და პეროქსიაცეტილნიტრიტის $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$ (პან) წარმოქმნას, რომლებიც სმოგის შედგენილობაში შედის.

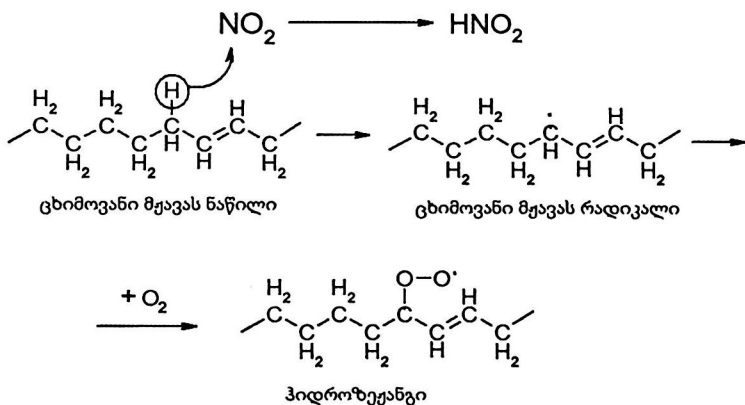
აზოტის მონოოქსიდი არ აღიზიანებს სასუნთქ გზებს და ამიტომ ადამიანმა, შესაძლოა, ის ვერ იგრძნოს. ჩასუნთქვისას NO ჰემოგლობინთან წარმოქმნის არამდგრად ნიტროზნაერთს, რომელიც სწრაფად გარდაიქმნება მეტჰემოგლობინში. მეტჰემოგლობინის Fe^{3+} იონს არ შეუძლია შექცევადად დაუკავშირდეს O_2 -ს და მონაწილეობა მიიღოს ჟანგბადის გადატანაში. სისხლში მეტჰემოგლობინის კონცენტრაცია 60-70%-ს თუ აღწევს, მომაკვდინებლად ითვლება, თუმცა ამ ნაერთის ასეთი ზღვრული მნიშვნელობა შეიძლება დაგროვდეს მხოლოდ დახურულ შენობებში, ისიც ძალიან იშვიათად.

NO ძალიან ადვილად გადადის NO_2 -ში. ეს უკანასკნელი მურა ფერის აირია, რომელიც განსაკუთრებით ძლიერად აღიზიანებს ლორწოვან გარსს. ნესტთან კონტაქტში ორგანიზმში წარმოიქმნება აზოტოვანი და აზოტის მჟავები. ისინი „ჭამენ“ ფილტვების ალვეოლების კედლებს, რომლებიც იმდენად შეღწევადი ხდება, რომ სისხლის შრატს ატარებს ფილტვების ღრუში. ჩასუნთქვისას ამ სითხეში იხსნება ჰაერი და წარმოიქმნება ქაფი, რომელიც ხელს უშლის ფილტვებში აირთა ცვლას.

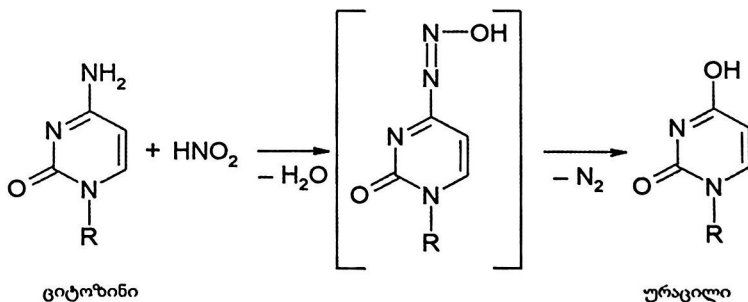
აზოტის ოქსიდების მოქმედება მცენარეებზე შეიძლება განხორციელდეს მჟავური ნალექების სახით, მცენარეებთან პირდაპირი კონტაქტით და ირიბად, დამჟანგველების, (მაგალითად, ოზონის) ფოტოქიმიური წარმოქმნით.

NO_2 -ს შეუძლია უშუალოდ დაჟანგოს უჯრედის მემბრანების ცხიმოვანი მჟავები. ეს რეაქცია წყალბადის მოხლეჩით და რადიკალის წარმოქმნით მიმდინარეობს. გარდა ამისა, NO_2 -ს შეუძლია მიუერთდეს უჯერი ცხიმოვანი მჟავების ორმაგ ბმებს და მაღალაქტიური რადიკალი წარმოქმნას (ნახ. 26) [55].

უჯრედებში წარმოქმნილი აზოტოვანი მჟავა ხასიათდება მუტაგენური მოქმედებით, ნუკლეინის მჟავას ჟანგვითი დეზამინირების გზით. ამის მაგალითია ციტოზინის გარდაქმნა ურაცილად (ნახ. 27).



ნახ. 26. ჰიდროპეროქსიდების წარმოქმნა არანაჯერი ცხიმოვანი მჟავებისგან NO_2 -ის მოქმედებით



ნახ. 27. ციტოზინის გარდაქმნა ურაცილად HNO_2 -ის მოქმედებით

სამრეწველო ნაგებობათა სამუშაო ზონის ჰაერში აზოტის მონოქსიდის შემცველობა შეადგენს დაახლოებით 5 მგ/მ³-ს, ქალაქის ატმოსფერულ ჰაერში მაქსიმალური ერთჯერადი ზღვ შეადგენს 0,4 მგ/მ³-ს, ხოლო საშუალო დღელამური ზღვ - 0,06 მგ/მ³-ს.

აზოტის დიოქსიდი (NO₂) - მურა ფერის აირია, დამახასიათებელი მკვეთრი სუნით. მოლეკულური მასა ტოლია 46,008-ის, NO₂-ის სიმკვრივე 0 °C ტემპერატურასა და 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევაზე შეადგენს 1,490 კგ/მ³-ს, სითბოტევადობა - 36,7 ჯოლი/(მოლი · K)-ს ლღობის ტემპერატურა -11,9 °C, დუღილის ტემპერატურა - +21 °C, კრიტიკული ტემპერატურა -158 °C, კრიტიკული წნევა - 10,1 მპა-ს. აზოტის დიოქსიდი იმ ნივთიერებებს მიეკუთვნება, რომლებიც სერიოზულ საშიშროებას წარმოადგენს ადამიანის ჯანმრთელობისთვის [95].

აზოტის დიოქსიდის ხანმოკლე ზემოქმედება ადამიანის ორგანიზმზე იწვევს სასუნთქი გზების დაზიანებას, მოქმედებს თვალების და ცხვირხახის ლორწოვან გარსებზე, აზიანებს ფილტვის ქსოვილს და აქვეითებს ორგანიზმის გამძლეობას ინფექციური დაავადებებისადმი. სამრეწველო ნაგებობათა სამუშაო ზონის ჰაერში აზოტის დიოქსიდის ზღვ 2 მგ/მ³-ს შეადგენს, ქალაქის ატმოსფერულ ჰაერში მაქსიმალური ერთჯერადი ზღვ შეადგენს 0,085 მგ/მ³-ს, ხოლო საშუალო დღელამური - 0,04 მგ/მ³-ს.

2.10.3. ოზონი

ოზონი (O₃) ორგანიზმებზე NO₂-ის მსგავსად მოქმედებს. იგი იწვევს ფილტვების შეშუპებას, არღვევს ბრონქებში მოციმციმე ეპითელიუმის მოძრაობას, რაც აფერხებს ბრონქებიდან უცხო ნივთიერებების გამოტანას. ყოველდღიურ რეჟიმში ეს იწვევს კიბოს დაავადების საშიშროების გაზრდას.

უმაღლეს მცენარეებზე მოქმედებისას ოზონი აზოტის ოქსიდებზე ბევრად ტოქსიკურია. იგი ცვლის უჯრედულ მემბრანათა სტრუქტურას, ზრდის წყლის და დაბალმოლეკულური ორგანული ნაერთების (გლუკოზა, ორგანული მჟავები, ამინომჟავები და ა.შ.) მემბრანაში განვლადობას. ამ პროცესების შედეგად ფოთლების

უჯრედები ნეკროზდება და მცენარეები ავადდება, რაც ფოთლების ვერცხლისებრი დალაქიანების სახელწოდებით არის ცნობილი.

2.10.4. ნახშირბადის მონოოქსიდი

ნახშირბადის მონოოქსიდი (ანუ „მზუთავი აირი“ - CO) უფერო, უსუნო აირია. მისი მოლეკულური მასა 28,01-ის ტოლია, სიმკვრივე 0°C ტემპერატურასა და 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევაზე შეადგენს $1,25 \text{ კგ/მ}^3$ -ს, სითბოტევადობა - $25,14 \text{ ჯ/(მოლ } K)$ -ს, ლღობის ტემპერატურა $-191,50^{\circ}\text{C}$ -ს, კრიტიკული ტემპერატურა - $-140,2^{\circ}\text{C}$ -ს, კრიტიკული წნევა - $3,48 \text{ მპა}$ -ს.

ადამიანისთვის ნახშირბადის მონოოქსიდი, უპირველეს ყოვლისა, საშიშროებას იმიტომ წარმოადგენს, რომ იგი შეიძლება დაუკავშირდეს სისხლის ჰემოგლობინს. გარდა ამისა CO-ს შეუძლია წარმოქმნას მაღალტოქსიკური ნაერთები - კარბონილები. სისხლის ჰემოგლობინთან ურთიერთქმედებით ნახშირბადის მონოოქსიდი, ისევე როგორც ჟანგბადი, გარკვეულ კოორდინაციულ მდგომარეობას იკავებს ჰემში. ჰემოგლობინის სწრაფვა CO-სადმი 200-300-ჯერ მაღალია, ვიდრე O_2 -ის მიმართ. გამოთვლილია, რომ ატმოსფეროში CO-ს კონცენტრაცია, რომელიც ტოლია $0,006\%$ -ისა (მოცულობითი) საკმარისია სისხლში მთელი ჰემოგლობინის შესაბოჭად [55]. ნახშირბადის მონოოქსიდით მოწამლული ადამიანს ეწყება სისხლძარღვთა სპაზმები და თავის ტკივილი, იმუნოლოგიური აქტიურობის დაქვეითება, გონების დაკარგვა და სხვა სიმპტომები, რასაც ხშირად ლეტალური შედეგი მოჰყვება. გამოთვლილია, რომ ატმოსფეროში CO-ს $0,006\%$ (მოცულობითი) კონცენტრაცია საკმარისია არსებული ჰემოგლობინის ნახევრის შესაბოჭად სისხლში. სამრეწველო ნაგებობათა სამუშაო ზონის ჰაერში ნახშირბადის მონოოქსიდის ზღვ შეადგენს 20 მგ/მ^3 -ს, ხოლო საშუალო სადღეღამისო ზღვ - 3 მგ/მ^3 -ს.

ბუნებრივ პირობებში ნახშირბადის მონოოქსიდის მაქსიმალური რაოდენობა ვულკანური ამოფრქვევების და ატმოსფეროში მეთანის ფოტოქიმიური დაჟანგვის შედეგად წარმოიქმნება. გაანგარიშებულია, რომ სადღეისოდ ატმოსფეროში ნახშირბადის მო-

ნოქსიდის ჯამური შემცველობა დაახლოებით 60 მილიონ ტონას შეადგენს. CO-ს წარმოქმნის სხვა მნიშვნელოვან წყაროს წარმოადგენს ანთროპოგენური გამონაფრქვევები. შიგაწვის ძრავებში საწვავის დაჟანგვის ოპტიმალური პირობები იქმნება მხოლოდ განსაზღვრულ სამუშაო რეჟიმზე გადასვლისას. როგორც წესი, ეს ეკვივალენტურია ძრავის 75% სიმძლავრისა, მაგრამ სხვა რეჟიმებშიც, განსაკუთრებით მანქანის უქმი სვლის დროს და ძრავის ამუშავებისას გამონაბოლქვ აირებში CO-ს შემცველობა მნიშვნელოვნად მატულობს. გამონაბოლქვი აირებიდან CO-ს მოსაცილებლად საავტომობილო კომპანიები იყენებენ სპეციალურ კატალიზატორებს, რომლებიც ხელს უწყობს CO-ს სრულ დაჟანგვას CO₂-მდე. გლობალური მასშტაბით, ავტოტრანსპორტის შიგაწვის ძრავის მიერ გამოყოფილი CO ჰაერში განიბნევა და საშიშ კონცენტრაციას არ აღწევს, მაგრამ დიდ ქალაქებში წნევის და ტემპერატურული ინვერსიის გამო CO-ს შემცველობამ შესაძლოა კრიტიკულ კონცენტრაციებს მიაღწიოს. საავტომობილო კომპანიები გამონაბოლქვი აირების CO-საგან გასაწმენდად იყენებენ სპეციალურ კატალიზატორებს, რომლებიც გამონაბოლქვში არსებულ CO-ს მთლიანად ჟანგავს CO₂-მდე.

ცხადია, რომ CO-ს უწყვეტი ანთროპოგენური და ბუნებრივ გამოყოფას მის ხანგრძლივ არსებობასთან ერთად ატმოსფეროში უნდა გამოეწვია CO-ს კონცენტრაციის ბევრად მეტი ზარალი, ვიდრე ეს ფაქტიურად შეიმჩნევა. ამას ხელს უშლის უმაღლესი მცენარეები, წყალმცენარეები და, განსაკუთრებით, ზოგიერთი ტაქსონომიური ჯგუფის ნიადაგის მიკროორგანიზმები, რომლებიც ახორციელებენ CO-ს ფიქსაციას. უმაღლესი მცენარეები და მიკროორგანიზმები ბოჭავენ CO-ს ამინმჟავა სერინის საშუალებით ან ჟანგვენ CO₂-ად.

თავი 3

ეკოლოგიურ ტექნოლოგიათა მრავალფეროვნება

ცნება „ეკოლოგია“ მოღვაწეობის განსაკუთრებით ფართო სპექტრს მოიცავს. მოქმედებათა ნებისმიერი თანმიმდევრობა, რომელსაც კონკრეტული მიზნის მისაღწევად მივყავართ (პროდუქტის მიღება, მოქმედების მექანიზმის დადგენა, ალგორითმის შექმნა, სწავლების მეთოდის შემუშავება და ა.შ.), შეიძლება ტექნოლოგიის მაგალითად ჩაითვალოს. ტექნოლოგიების ნუსხა და სხვადასხვა პროფილის კოლოსალური ნაკრები იმდენად დიდია, რომ მათი ჩამოთვლაც ფართო მონოგრაფიის მასშტაბითაც კი შეუძლებელია. როგორც წესი, ნებისმიერი ტექნოლოგია ეძღვნება კონკრეტულ ამოცანას, რამაც მისი შექმნა განაპირობა. სოლიდური ისტორიის მქონე მრავალგვარი ტექნოლოგიების რიცხვს დაემატა შედარებით ახალი ინოვაციური ეკოლოგიური ტექნოლოგიები, რომელთა არსი გარემოს აქტიურ დაცვაში მდგომარეობს.

როგორც პრაქტიკამ აჩვენა, მრავალგვარი ეკოლოგიური ტექნოლოგიები უზრუნველყოფს გარემოს ძირითადი კომპონენტების - ატმოსფეროს, წყლისა და ნიადაგის დაცვას გამაბინძურებელი ნივთიერებების ზემოქმედებისგან (ტოქსიკური და კანცეროგენური თვისებების მქონე, მყარი მტვრის ნაწილაკები, თხევადი აეროზოლები, აირადი ნივთიერებები), ფიზიკური ველებისგან (ხმაური, ვიბრაციები, ელექტრომაგნიტური, მაიონიზირებელი და სითბური გამოსხივება) და ბიოლოგიური გამაბინძურებლებისგან (მიცელისა-ლური სოკოები, ბაქტერიები, ვირუსები, პათოგენური მწერები).

XX საუკუნის მეორე ნახევრიდან დაწყებული ტექნოლოგიური პროცესების დამუშავება ყველა მიმართულებით არნახული ტემპებით ვითარდებოდა. ეს რევოლუციური ტექნოლოგიური ნახტომი ეფუძნებოდა იმ დროისთვის უკვე მიღწეულ მაღალ სამეცნიერო ცოდნის დონეს, როგორც საბუნებისმეტყველო, ისე საინჟინრო და ჰუმანიტარულ დარგებში. მეცნიერულ-ტექნიკური სფეროში გასული საუკუნის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან სამეცნიერო მიღწევად აუ-

ცილებლად უნდა ჩაითვალოს გარემოსდაცვითი ტექნოლოგიური პროცესების მეცნიერული საფუძვლების შექმნა.

თანამედროვე ეკოლოგიურ პრობლემათა გადასაწყვეტად ახალი ტექნოლოგიური მიმართულებები წარმოიშვა. ინოვაციური პრინციპების გამოყენებით მუშავდება ახალი ტექნოლოგიები ატმოსფეროში CO₂-ის და მეთანის კონცენტრაციების მატების, როგორც გლობალური დათბობის ძირითადი მიზეზის წინააღმდეგ. ნახშირბადის ციკლის ცვლილება არსებითად დაკავშირებულია ნახშირორჟანგის კრიტიკულ დონემდე წარმოქმნასთან, რომელიც პრაქტიკულად აღემატება პლანეტის ფოტოსინთეზურ პოტენციალს. XX საუკუნის ოთხმოციანი წლებიდან დაწყებული მეთანის ჭარბი რაოდენობით წარმოქმნა, წარმოადგენს მრეწველობისა და სოფლის მეურნეობის მასშტაბების ინტენსიური ზრდის შედეგს, რაც მნიშვნელოვანწილად უწყობს ხელს გლობალურ დათბობას. მნიშვნელოვანია, აღინიშნოს, რომ სათბურის აირები - მეთანი და ნახშირორჟანგი ატმოსფეროში უცვლელად რამდენიმე წელი ნარჩუნდება, მაშინ როცა ტოქსიკური აირადი დამბინძურებლის - აზოტის დიოქსიდის (NO₂) „სიცოცხლის ხანგრძლივობა“ გაცილებით დიდი ხნით განისაზღვრება.

XXI საუკუნეში სხვადასხვა პროფილის მეცნიერთა და სპეციალისტთა (პოლიტიკოსების, სოციოლოგების, ინჟინრების, ფიზიკოსების, ქიმიკოსების, ექიმების, აგრარიკების) მოღვაწეობის აქტიურ სფეროდ იქცა ინოვაციური ეკოლოგიური ტექნოლოგიების დამუშავება და შეფასება, რამაც სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი ხასიათი მოიპოვა. ეკოლოგიური მონაცემების შეპირისპირებით, რომლებიც ეხება ბუნების ძირითად კომპონენტებს, სრულიად ნათელი ხდება, რომ ატმოსფერული ჰაერი, ნიადაგი და წყალი ერთმანეთთან მჭიდროდ დაკავშირებული ნიშებია და თითოეული მათგანის სისუფთავის ხარისხს განსაზღვრავს.

ბუნებაში ნიადაგის ბიოლოგიური თვითგაწმენდა სისტემატურად მიმდინარეობს ნიადაგისთვის არადამახასიათებელი ნივთიერებების თანდათანობითი მოცილებით. ეს პროცესი ბუნებრივად ხორციელდება, მაშინ როცა გარემოს ტექნოგენური გაბინძურების პროცესების ტემპები ბუნებრივი თვითგაწმენდის პროცესების სიჩქარეს ბევრად აღემატება. ამასთან დაკავშირებით, შემუშავებულ-

ლია მრავალი ტექნოლოგია, რომლებიც სხვადასხვა პრინციპებით ახორციელებს ნიადაგის გაწმენდას ტოქსიკური და ნიადაგისთვის არადამახასიათებელი ნივთიერებებისგან. ამ ტექნოლოგიების საფუძველს უნდა წარმოადგენდეს ბუნებისათვის უსაფრთხო ყველა ტექნოლოგია, მათი ეფექტიანობის და მათ გამოყენებასთან დაკავშირებული ფინანსური ხარჯების გათვალისწინებით.

2017 წელს გაერომ წარმოადგინა პროგრამა „ბრძოლა პლასტმასებით დაბინძურებას“ [96], რომლის მიზანია გარემოს პირობების გაუმჯობესება ფართოდ გავრცელებული პლასტმასებით გაბინძურების აღმოსაფხვნელად. ეკოლოგიური ტექნოლოგიების სფეროში საკმაოდ სერიოზული მიღწევების მიუხედავად, კლასიკურ და ახალ ინოვაციურ ეკოლოგიურ ტექნოლოგიებს ჯერ კიდევ არ შეუძლია გლობალურად გადაჭრას ეკოლოგიური პრობლემები. ამის დამამტკიცებელია მთელი პლანეტის მასშტაბით ტექნოგენური ტოქსიკური ნაერთების სისტემატური მატება.

სათბურის აირთა ემისიის შემცირების მიზნით, საკვების და სასმელების ერთ-ერთმა უმსხვილესმა მწარმოებელმა კომპანიამ “Pepsico” განახორციელა ინოვაციური პროექტის რეალიზაცია, რომელიც გულისხმობს მზის თბური ელექტროსადგურის არსებობას, რომელიც შთანთქავს მზის სხივებს და ახდენს მათ კონვერსიას სითბურ ენერგიად, სამრეწველო წყლის გასათბობად. ამ ტექნოლოგიის საშუალებით შესაძლებელი გახდა ბუნებრივი აირის მოხმარების 140 000 მ³-ით დაზოგვა, რაც სათბურის აირთა ემისიას 280 ტონით ამცირებს და თითქმის 18 000 ხის ეკვივალენტურია.

პლანეტის ინდუსტრიალიზაცია მოითხოვს ენერჯიის ახალი წყაროების მოძიებას. ატომური ელექტროსადგურების მიმართ განსხვავებული შეხედულებები არსებობს. მაგალითად, გერმანია გეგმავს თავის ელექტროსადგურების კონვერსიას მათი ეკოლოგიური უსაფრთხოებიდან გამომდინარე. ნიდერლანდები, კონტინენტზე ბუნებრივი აირის ერთ-ერთი შიგა მომწოდებელი, ასევე გეგმავს (მიწისქვეშა ზიბგების შემდეგ) დახუროს თავისი უმსხვილესი საბადო.

დამატებითი ენერჯიის მისაღებ ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს არატრადიციულ წყაროს წარმოადგენს მზის ენერჯია. ცნობილია, რომ მზის ენერჯიამ არა მარტო ქარის ენერჯიას გაუსწრო, არამედ,

რაც ძალზე მნიშვნელოვანია, ნაწილობრივ შეამცირა წიაღისეული საწვავის გამოყენება. მზის დანადგარები სულ უფრო და უფრო კონკურენტუნარიანი ხდება ბუნებრივი აირთან და ნახშირთან შედარებით. მზის ენერჯიას ძალიან ეფექტიანად იყენებს ჩინეთი, რომელიც ამ მიმართულებით მსოფლიო მასშტაბით ლიდერს წარმოადგენს.

სხვა შესაძლებლობებს შორის აუცილებელია აღინიშნოს წყალბადი, როგორც ალტერნატიული სათბობის ერთ-ერთი ყველაზე პერსპექტიული სახეობა, რომლის მარაგი პრაქტიკულად ულევია. მისი გამოყენება აირად ან თხევად მდგომარეობაში დღუშიან ძრავებში შესაძლებელია განხორციელდეს შემდეგი კონცეპტუალური მიდგომების გათვალისწინებით: 1. წყალბადის გამოყენება ძირითადი დანამატის სახით ძირითად საწვავზე (ბენზინის და დიზელის ძრავები); 2. წყალბადის ძრავა უშუალო შეფრქვევით.

წყალბადის დამატება ტრადიციულ ნახშირწყალბადოვან საწვავზე აუმჯობესებს დღუშიანი ძრავის ეკოლოგიურ და სიმძლავრის მაჩვენებლებს [97]. სამეცნიერო, მათ შორის, საპატენტო ლიტერატურაში აღწერილია მრავალფეროვანი ეკოლოგიური მეთოდები და ტექნოლოგიები, რომლებიც დაფუძნებულია ფიზიკურ (მექანიკურ), ქიმიურ, ბიოლოგიურ პრინციპებზე [61, 98-101].

მონოგრაფიაში მოკლედ განხილულია ფართოდ გავრცელებული ეკოლოგიური ტექნოლოგიების პოტენციალი, ეკოსისტემის აღდგენის პრინციპები და გარემოს დაცვის მეთოდები. ცალკე თავი ეძღვნება ავტორთა მიერ მოწოდებული ახალი ინოვაციური ბიოლოგიურ-ეკოლოგიური კონცეფციის მასშტაბისა და პერსპექტივების განსჯას.

დამუშავებულია ჰაერის გაწმენდის საკმაოდ ეფექტიანი კატალიზური და პლაზმოქიმიური მეთოდები [102, 103]. გამაზინდურებელი ნივთიერებისგან გაწმენდის არსებულ მეთოდებთან ერთად (ელექტროქიმიური, ბიოლოგიური, სორბციული, კატალიზური), უკანასკნელ წლებში გავრცელება ჰპოვა პლაზმაკატალიზურმა ტექნოლოგიებმა. პლაზმა, როგორც ცნობილია, აირია, რომელშიც მოლეკულები იონიზებულ მდგომარეობაში იმყოფება. იგი შედგება მრავალი კომპონენტისგან: სხვადასხვა ენერჯიის მქონე ელექტრონებისგან, დადებითი და უარყოფითი იონებისგან, ნეიტრალური

ნაწილაკებისგან. მავნე ნივთიერებათა კონვერსიის პროცესი მიმდინარეობს შემდეგი მექანიზმით: გაბინძურებული ჰაერი შედის აირგანმუხტვის რეაქტორში, სადაც ხდება მავნე ნივთიერებათა დაშლა დაბალტემპერატურული პლაზმით. ჰაერის კატალიზური გაწმენდის ტექნოლოგია დაფუძნებულია კონვერსიის პროდუქტების ღრმა დაჟანგვაზე, რომლებიც წარმოიქმნება პლაზმაქიმიურ რეაქტორში ჰაერის გატარებისას. ტექნოლოგია გათვლილია დაბალტემპერატურული კატალიზატორის მოქმედებაზე, რომელიც მოქმედების პლაზმაქიმიური მექანიზმის წყალობით ეფექტიანად მუშაობს 20-დან 50°C-ის ტემპერატურულ დიაპაზონში.

კლასიკურ და ინოვაციურ ეკოლოგიურ ტექნოლოგიებთან დაკავშირებით გამოთქმულია მთელი რიგი მოსაზრებები, რომელთაც გააჩნია სოციალური ხასიათი, მაგრამ ეკოლოგიის პრობლემებთან არის დაკავშირებული. ასე, მაგალითად, ცნობილმა ფრანგმა ფილოსოფოსმა ბრუნო ლატურმა წამოაყენა პოლიტიკური ეკოლოგიის ახალი კონცეფცია [104]. ავტორის აზრით, ბოლო დროს განვითარებული პოლიტიკური ეკოლოგიის იდეას, რომელიც წამოყენებულ იქნა გარემოზე ზრუნვის ფუძემდებლური პოლიტიკური პრინციპის სახით, პერსპექტივა არ გააჩნია. პოლიტიკას არ შეუძლია ბუნების ინტერესების დაცვა, რადგან შექმნილია ადამიანის ინტერესების დასაცავად, რომელიც მის სუბიექტურ პოლიტიკას წარმოადგენს. მხოლოდ მაშინ შეუძლია ბუნების დაცვა, თუ მას მივანიჭებთ სუბიექტურ თვისებებს და შესაბამის უფლებებს. შესაძლებელია, ამ ერთი შეხედვით უცნაურ განცხადებაში არის სრულიად რაციონალური იდეა, რომ ბუნება დაკანონდეს ყველა უფლებითა და მოვალეობით, მისთვის ყველა ქვეყნის მოვალეობის განმსაზღვრელი კანონიკური ხასიათის მისაცემად.

3.1. ფიზიკური ტექნოლოგიები

ფიზიკური ტექნოლოგიები დაფუძნებულია ფიზიკურ პრინციპებზე და ხორციელდება სხვადასხვა ტექნოლოგიებითა და მეთოდებით: დასხივებით, ტექნოგენურ ნივთიერებათა ადსორბციით სპეციალურ სორბენტებზე, ფიზიკური სეპარაციით, იონური და მოლეკულური დაყოფის პრინციპით და ა.შ. თვისებრივი მაჩვენებ-

ლებით ფიზიკური ტექნოლოგიები საკმაოდ ეფექტიანია, მაგრამ მოითხოვს გარკვეულ მატერიალურ და ფინანსურ ხარჯებს (სპეციფიკური მასალები და დანადგარები), რაც მათ გამოყენებას ხშირად აძვირებს და, შესაბამისად, არარენტალეზურს ხდის. ეს ტექნოლოგიები მაღალი ეფექტიანობის გამო იმ შემთხვევებში გამოიყენება, როცა სხვა ეკოლოგიური ტექნოლოგიები სასურველ შედეგს არ იძლევა.

ზოგიერთი ფიზიკური ტექნოლოგია დაფუძნებულია მექანიკურ ზემოქმედებაზე (დაპრესვა, ფილტრაცია, დალექვა). მექანიკური ტიპის ტექნოლოგია ითვალისწინებს გამდინარე გაბინძურებული წყლებისთვის გამწმენდი სისტემის შექმნას, ნარჩენების დალექვას და დაპრესვას, რაც ამცირებს მოცულობისა და შემდგომში აიოლებს მათ გადამუშავებას, მექანიკური ფლოკულაციის პრინციპის გამოყენებით. რიც შემთხვევაში მიმართავენ სხვადასხვა ზომის მექანიკური ფილტრების გამოყენებას, რომლებიც განსხვავდება სიმძლავრით და გამტარიანობით. მექანიკური ტექნოლოგიები ასევე აქტიურად გამოიყენება წყლის და დაბინძურებული წყალხსნარების გაწმენდის საწყის ეტაპებზე. მექანიკური ფილტრების საკმაოდ მაღალი ეფექტიანობა, რომელთა მოქმედება დაფუძნებულია სხვადასხვა ტიპის სორბენტთა უნარზე, სამრეწველო კვამლს მოაცილონ აირადი ტოქსიკური გამაბინძურებელი ნივთიერებები (მაგალითად, გოგირდის დიოქსიდი), ასევე მცირე ზომის მყარი ნაწილაკები.

ფიზიკურ ტექნოლოგიებს მიეკუთვნება გაბინძურებული გრუნტის შეგროვება და ჩამარხვა [35, 105]. სავარაუდოდ, ეს ისტორიულად პირველი წარმატებული ეკოლოგიური ოპერაციაა, რომელსაც ჩვენი წინაპრები გარემოს გაბინძურების თავიდან ასაცილებლად იყენებდნენ. ამ ტექნოლოგიის ძირითადი ნაკლი ის არის, რომ არ ხდება გაბინძურებული გრუნტის, ნიადაგის ან ნებისმიერი სხვა დამარხული ობიექტის სწრაფი რემედიაცია, მაგრამ ასეთი მოქმედებით შესაძლებელია გაბინძურებული ობიექტის გარემოდან ან ცალკეული ეკოსისტემიდან იზოლირება. გასაგებია, რომ არსებობს დამარხული გაბინძურების ნებისმიერი ფორმის გავრცელების რისკი (მაგალითად, გამორეცხვის გზით (ექსტრაქციით), მიკრობიოლოგიური კონვერსიით, ტემპერატურის ცვლილებით და ა.შ.).

ასეული წლების წინ, როცა გარემოს გაბინძურების ხარისხი უმნიშვნელო იყო, გაბინძურებული ნიადაგი სწრაფად განიცდიდა რემედიაციას ნიადაგის მიკროფლორის ზემოქმედებით. მიკროორგანიზმების გარდა ამ პროცესში აქტიურად მონაწილეობს ერთწლიანი და მრავალწლიანი მცენარეების ფესვთა სისტემა. ასეთი პრიმიტიული ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგია იშვიათად, მაგრამ დღესაც მაინც გამოიყენება, განსაკუთრებით, განვითარებად ქვეყნებში. არსებობს ნიადაგების გამწმენდი უფრო ეფექტიანი და უფრო ძვირადღირებული ფიზიკური ტექნოლოგიები [106].

ელექტროქიმიური გაწმენდის ტექნოლოგიას იყენებენ ნიადაგებიდან სხვადასხვა ნავთობპროდუქტების, ფენოლების და ქლორშემცველი ნახშირწყალბადების მოსაცილებლად. ნიადაგში ელექტრული დენის მოძრაობისას ხდება წყლის ელექტროლიზი, ელექტროკოაგულაცია, ელექტროქიმიური ჟანგვის და ელექტროფლოტაციის რეაქციები. ამ ტექნოლოგიით ფენოლური ნაერთების 90% იჟანგება. ნიადაგის გაუვნებლყოფის ხარისხობრივი დონე, ელექტროქიმიური გაწმენდისას, 100%-ს უახლოვდება (მინიმალური - 95%-ს). მეთოდი ასევე ნიადაგიდან მძიმე მეტალების (ვერცხლისწყალი, ტყვია, კადმიუმი), დარიშხანის, ციანიდების მოცილების საშუალებას იძლევა. ტექნოლოგიის ნაკლს პროცესის სიძვირე წარმოადგენს (100-250 დოლარი 1 მ³ ნიადაგზე) [106].

ელექტროკინეტიკური გასუფთავება გამოიყენება ნიადაგის გასაწმენდად ციანიდებისგან, ნავთობისგან, ნავთობის ნახშირწყალბადებისგან, მძიმე მეტალებისგან, ქლორორგანული და სხვა ტოქსიკური ნაერთებისგან. ელექტროკინეტიკური გაწმენდა წარმატებით შეიძლება გამოყენებულ იქნას თიხნარი ნიადაგის შემთხვევაში. ელექტროკინეტიკური ტექნოლოგიის ეფექტიანობა შეადგენს 80-დან 99%-ს. მისი ღირებულებაა 100-170 აშშ დოლარი 1 მ³ ნიადაგზე.

თერმული დამუშავება მიეკუთვნება ინტენსიურად და ფართოდ გამოყენებულ ტექნოლოგიებს. რემედიაციისთვის გამოყენებულ ობიექტს (გაბინძურებული ნიადაგი, გრუნტი ან ნებისმიერი სხვა ობიექტი) ამუშავებენ 1000-1200 °C ტემპერატურული რეჟიმის პირობებში, რომლის დროსაც ხდება ტოქსიკურ ნივთიერებათა აორთქლება, გამოწვა და, შესაბამისად, ობიექტის გასუფ-

თავება. შემდეგ გრუნტს აცილებენ გამოყოფილ აირებს, რომლებსაც აგროვებენ და სხვა მიზნით იყენებენ. რაც შეეხება გრუნტს (ნიადაგს), მას ხშირად საწყის ადგილზე აბრუნებენ. ამ ტექნოლოგიას იყენებენ იმ შემთხვევაში, როცა გრუნტი გაბინძურებულია სტაბილური თერმომედეგი ტოქსიკური ნაერთებით (მაგალითად, ქლორორგანული პესტიციდებით, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადებით და სხვ.). შესაბამისად, ასეთი ტექნოლოგია გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როცა შედარებით მცირე რაოდენობის მასალა (სუბსტრატი - გრუნტი, ნიადაგი) მოითხოვს ქიმიურად სტაბილური ბუნების ტოქსიკური კომპონენტებისგან გაწმენდას. სამრეწველო მასშტაბებით, ნიადაგის ან გრუნტის დიდი მასის პირობებში, ამ ტექნოლოგიის გამოყენება არსებითად შეზღუდულია. აღნიშნულ ტექნოლოგიას კიდევ ერთი უარყოფითი მხარე გააჩნია, კერძოდ, თერმული დამუშავების პროცესში გადასამუშავებელ ნიადაგში (გრუნტში) მთლიანად იღუპება ყველა ტაქსონომეტრული ჯგუფის ნიადაგებისთვის დამახასიათებელი მიკროორგანიზმები. ნიადაგის მიკრობიოტის სრულფასოვანი აღდგენისთვის (ნიადაგის ტიპის და რეგიონის კლიმატის გათვალისწინებით) კი წლებია საჭირო. ამასთან, თავად ტექნოლოგია საკმაოდ ძვირია, რადგან რემედიაციული მასალის ტრანსპორტირება და მაღალტემპერატურული რეჟიმის შექმნა დიდი მოცულობის ნიადაგისთვის ან გრუნტისთვის დიდ ენერგეტიკულ ხარჯებს მოითხოვს.

3.2. ქიმიური ტექნოლოგიები

ყველა ქიმიური ქარხანა, დამოუკიდებლად მათი ზომების და წარმოებული პროდუქციისა, გარემოსთვის სერიოზულ საშიშროებას წარმოადგენს [107]. ნებისმიერი ქიმიური, მეტალურგიული, ნავთობგადამამუშავებელი ქარხანა, როგორც თანამედროვე ტექნოლოგიებით და აპარატურითაც არ უნდა იყოს აღჭურვილი, წარმოების პროცესში მაინც აბინძურებს გარემოს სხვადასხვა ტოქსიკური ნივთიერებებით. მიუხედავად იმისა, რომ თანამედროვე ქიმიურ ქარხნებში გამაბინძურებელ ნივთიერებათა კონცენტრაცია გამონაბოლქვებსა და ჩამდინარე წყლებში უმნიშვნელოა, მუდმივი საწა-

რმოო პროცესების წარმართვა მაინც იწვევს გარემოში ტოქსიკურ ნივთიერებათა სოლიდური რაოდენობის ემისიას.

ტოქსიკური ნივთიერებებისგან ნიადაგის გაწმენდის ქიმიური ტექნოლოგიები ეფუძნება ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებათა ხსნარების, ორგანული გამხსნელების ან აქტიური დამჟანგველების (აქტიური ჟანგბადი და ქლორი, ტუტიანი ხსნარები) გამოყენებას. ეს ტექნოლოგიები ძირითადად ნიადაგის სხვადასხვაგვარი არაბუნებრივი კომპონენტებისგან, მათ შორის, ნახშირწყალბადებისგან გასაწმენდად გამოიყენება. შემდგომი ოპერაციები მოიცავს მის რეკულტივაციას. ნიადაგის გაწმენდის ქიმიური მეთოდების უარყოფით მხარედ, უმრავლეს შემთხვევაში, უნდა ჩაითვალოს მიკროფლორის განადგურება ნიადაგის მოცემულ სეგმენტში, დიდი რაოდენობით გაბინძურებული წყლის დაგროვება, რომელიც ჩვეულებრივი წესით უნდა გაიწმინდოს.

დაახლოებითი წარმოდგენა მაინც რომ გვექონდეს, თუ რა მასშტაბის ეკოლოგიური პრობლემების გადაჭრაა აუცილებელი, მოვიყვანოთ შემდეგი მაგალითი: არსებული მონაცემებით, სასარგებლო წიაღისეულის წლიური 100 მილიარდი ტონის რაოდენობის გადამუშავებისას გარემოში ხვდება დაახლოებით 10 ათასი სახის ანთროპოგენური ქიმიური ნივთიერება, მათ შორის: 60 მლნ. ტონა სინთეზური კომპონენტები; 700-800 მლნ ტონა სასუქები; 5 მლნ ტონა პესტიციდები; 50 მლნ ტონა რკინა; 500 მლრდ მ³ გადამუშავებული თხევადი მასა. გარდა ამისა, წარმოების პროცესში რჩება 10 მლრდ ტონა მყარი ნარჩენები, რაც საწყისი წიაღისეულის 10%-ია.

ერთ-ერთ ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ქიმიურ-ეკოლოგიური ტექნოლოგიაა ნიადაგში სხვადასხვა სტრუქტურის ტოქსიკურ კომპონენტთა სტაბილიზაცია/იმობილიზაცია. ეს ხდება უშუალოდ გაბინძურების ადგილზე და არ საჭიროებს გრუნტის გადატანას. ტექნოლოგიური პროცესის შედეგად გაბინძურებულ გრუნტში შეაქვთ კომპონენტები, რომლებიც უკავშირდება ტოქსიკურ გამაბინძურებელ ნივთიერებებს, წარმოიქმნება ახალი, ნაკლებად ტოქსიკური კომპლექსური ნივთიერებები, რომლებიც მცირე ხსნადობის გამო ნიადაგში არ ვრცელდება. სტაბილიზაციის ან იმობილიზაციის ტექნოლოგია ხშირად წარმატებით გამოიყენება მძიმე

მეტალებით გაბინძურებულ ნიადაგებში, რისი მაგალითიცაა ფოსფატების დამატება ტყვიის შემცველ ნიადაგში [108, 109].

განსაკუთრებით ინტერესს წარმოადგენს სორბციის ტექნოლოგია, რომელიც დაფუძნებულია მყარი ან აირადი ტექნოგენური ქიმიური ნივთიერებების ადსორბირებაზე ან სხვა ქიმიურ ნივთიერებებთან დაკავშირებაზე. მაგალითად, მძიმე მეტალები *in situ* პირობებში უერთდება ზოგიერთ არატოქსიკურ რეაგენტს, რაც მნიშვნელოვნად ამცირებს წარმოქმნილ ნივთიერებათა ტოქსიკურობას. რიგ შემთხვევებში იყენებენ ქიმიურ და ელექტროქიმიურ სეპარაციაზე დაფუძნებულ ტექნოლოგიებს.

3.3. ბიოლოგიური ტექნოლოგიები

ბიოლოგიური ტექნოლოგიები, ღომელთა არსიც მიკროორგანიზმების, მცენარეების, ფერმენტული პრეპარატების და სხვათა გამოყენებაა, წარმოადგენს შედარებით ახალ ეკოლოგიურ ტექნოლოგიების მიმართულებას, რომლის სრულყოფა კვლავაც აქტიურად გრძელდება. მათი პრაქტიკული გამოყენება არ არღვევს ბუნებაში არსებულ ეკოლოგიურ წონასწორობას და არ ანადგურებს ნიადაგის ბინადარ ორგანიზმებს. აუცილებელია აღინიშნოს, რომ ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიები ასევე დიდ ინტერესს იწვევს შედარებით მცირე მატერიალური დანახარჯების, ღირებულებისა და პროცესების ტექნოლოგიური სიმარტივის გამო.

ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიების არსი მდგომარეობს ზოგიერთი ორგანიზმის (ძირითადად, ერთ- და მრავალწლიანი მცენარეები, სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფის მიკროორგანიზმები) დამახასიათებელ უნარში, ნივთიერებათა ცვლის პროცესებთან ერთად განახორციელოს ტოქსიკურ ნივთიერებათა გარდაქმნა, დაშლა და გაუვნებელყოფა. პროცესის ძირითად მიზანს წარმოადგენს ტოქსიკანტების მინერალიზაცია ბუნებრივ არაორგანულ ნაერთთა წარმოქმნით (როგორცაა H_2O , CO_2 და სხვ.). მცენარეთა დამახასიათებელ თავისებურება აგრეთვე გულისხმობს მძიმე მეტალთა იონების შთანთქმას და შიგაუჯრედულ სივრცეში დაგროვებას. მთელ რიგ მცენარეთა ეს გენეტიკური დეტერმინირებული უნარი წარმო-

ადგენს მძიმე მეტალებით გაბინძურებული გარემოს ბიოლოგიური რემედიაციის საფუძველს.

მიკროორგანიზმები, განსაკუთრებით ბაქტერიები, ბევრად სწრაფად მრავლდებიან, ვიდრე ნებისმიერი სხვა ორგანიზმები. ისინი ახორციელებენ ორგანულ ნაერთთა დეგრადაციას, შლიან მათ ნახშირბადოვან ჩონჩხს, ხოლო ნახშირბადის და ელემენტთა გამოთავისუფლებული ატომები აქტიურად ერთვება უჯრედულ მეტაბოლიტთა სინთეზში [98]. ყველა ეს რეაქცია ფერმენტების მოქმედებას ეფუძნება და უპირატესად ტოქსიკანტების ჟანგვითი დეგრადაციის პრინციპით ხორციელდება. ეუკარიოტები (მცენარეები და მიცელიალური სოკოები) და პროკარიოტები (ბაქტერიები), მათთვის დამახასიათებელი დეგრადაციული პოტენციალით, გარემოს ათავისუფლებენ ორგანული ტოქსიკანტებისგან მათი სტრუქტურების (ნახშირბადოვანი ჩონჩხის) ღრმა დეგრადაციის გზით, რითაც მონაწილეობას იღებენ ნახშირბადის წრებრუნვაში [110].

მცენარეებისთვის დამახასიათებელია ყველაზე მასშტაბური კონტაქტები ტოქსიკანტებთან (ნიადაგში, ჰაერსა და წყალში). ისინი ახორციელებენ უცხო ნივთიერებათა ადსორბაციას, რის შემდეგაც ხდება მცენარეებში მათი შეღწევა, შიგაუჯრედული გავრცელება და აკუმულაცია. დროის განსაზღვრული პერიოდის შემდეგ (ადაპტაცია) იწყება ამ ნივთიერებათა სხვადასხვა ქიმიური გარდაქმნები (მაგალითად, ჟანგვა, აღდგენა, ჰიდროლიზი). დროის ეს საწყისი მონაკვეთი საჭიროა მცენარეული უჯრედის სტრუქტურების მობილიზაციისთვის. პროცესის განსახორციელებლად საჭიროა დამატებითი ენერჯის გენერაცია, აუცილებელ ფერმენტთა ინდუქციისათვის. რადგან ეს საკმაოდ ხანგრძლივი პროცესია, საჭიროა აზოტის დამატებითი წყარო. ამიტომ ტოქსიკურ ნივთიერებათა დეგრადაციის პროცესი მცენარეებში, მიკროორგანიზმებთან შედარებით, უფრო ხანგრძლივად მიმდინარეობს. ამ პროცესების დროს ძირითადად ხდება ორგანული ტოქსიკანტების ნახშირბადოვანი ჩონჩხის ჟანგვითი დეგრადაცია - რთული და მრავალსაფეხურიანი პროცესი, რაც დაკავშირებულია ტოქსიკურ ნაერთთა გაუვნებელყოფასთან. არსებული ექსპერიმენტული მონაცემებით, მცენარეებში ტოქსიკანტების დეგრადაციის პროცესი შეიძლება რამდენიმე დღე გრძელდებოდეს.

ფიტოექსტრაქცია. უცხო, გამაბინძურებელი ნივთიერებისგან ნიადაგისა და წყალსატევების გასუფთავების ერთ-ერთი ტექნოლოგიური მეთოდია ფიტოექსტრაქცია, რომლის არსია ფესვთა სისტემის საშუალებით გამაბინძურებლების შეწოვა და მცენარის მიწისზედა ნაწილში მათი ამოტანა. ფიტოექსტრაქცია განსაკუთრებით ეფექტიანია ნიადაგის გაწმენდისას მძიმე მეტალთა (სპილენძი, თუთია, ნიკელი, კობალტი, ტყვია, მანგანუმი, კადმიუმი, ვერცხლისწყალი და სხვ.) შემცველი ნაერთებისგან. ტექნოლოგიის განსახორციელებლად საჭიროა, გაბინძურებელ უბნებში მოხდეს მცენარეთა განსაზღვრული სახეობების მოშენება. ხშირად ამ მიზნით ე. წ. ჰიპერაკუმულატორ მცენარეებს იყენებენ, რომლებიც მეტალთა შეთვისების განსაკუთრებულად მაღალი უნარით გამოირჩევა. ფიტოექსტრაქციის პროცესის დამთავრებისას მცენარეები უნდა შეგროვდეს და დაიწვას. დაწვის შემდეგ მიღებული ფერფლი მაკვნი ნარჩენად ითვლება და აუცილებელია მისი სათანადო უტილიზაცია, ან სხვა ტექნოლოგიაში, როგორც რომელიმე მძიმე მეტალის წყაროს გამოყენება.

ბიორემედიაცია. დღევანდელი შეხედულებებით ეს ტექნოლოგია ეფუძნება მცენარეთა მიზანმიმართულ სელექციას და ნიადაგის მიკროფლორის აქტიურობის გაძლიერებას. ეს მიიღწევა გაბინძურებულ ნიადაგში წინასწარ შერჩეული, სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების წარმომადგენელი მიკროორგანიზმების (ბაქტერიები, მიცელიალური სოკოები) აქტიური შტამების შეტანით. ეს მიკროორგანიზმები ნიადაგის ადგილობრივ მიკრობიოტასთან თანაცხოვრებით ტოქსიკურ ნივთიერებათა დეგრადაციას (მინერალიზაციას) ახორციელებენ.

გაბინძურების შედარებით დაბალი დონის პირობებში, არსებული ბუნებრივი ბალანსის (წონასწორობის) ხანგრძლივი შენარჩუნების მიზნით, განსაკუთრებით ეფექტიანია სელექციურად შერჩეული ბალახოვანი, ბუჩქოვანი და მერქნიანი მრავალწლიანი მცენარეების გამოყენება. როგორც ეს მონოგრაფიის ავტორების მიერ იქნა დამტკიცებული, მცენარეების და მიკროორგანიზმების მიერ ერთობლივად განხორციელებული ორგანული ტოქსიკანტების დეგრადაცია ხასიათდება სინერგიული ხასია-

თით. ეს ნიშნავს, რომ მათი ჯამური მოქმედების ეფექტიანობა არსებითად მაღალია თითოეული მათგანით ცალკე მოქმედების არითმეტიკული ჯამზე. ამ პროცესს, რომელიც დაფუძნებულია ძირითადად მიკროორგანიზმების მოქმედებაზე, ეწოდება ბიორემედიაცია. დღეს ბიორემედიაცია ითვლება ერთ-ერთ ყველაზე პერსპექტიულ ეკოლოგიურ ბიოტექნოლოგიად. ამ ტექნოლოგიების გამოყენება შეიძლება რეკომენდებულ იქნას ნებისმიერი ნიადაგისთვის, მათთვისაც კი, რომელთა გამაბინძურებელ ნივთიერებათა კონცენტრაცია ზდკ-ს მნიშვნელობას ათჯერ და უფრო მეტად აღემატება.

3.4. წყლის და ნიადაგის რემედიაციის ტექნოლოგიები

3.4.1. წყალი

წყალი უაღრესად მნიშვნელოვანი, სოციალური, ეკონომიკური და თვით პოლიტიკური სუბსტანციაა, რომელიც მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს ადამიანის ჯანმრთელობას და მრეწველობის თითქმის ყველა სფეროს განვითარებას. მოსახლეობის არაპროგნოზირებადი ზრდა, ინტენსიური ურბანიზაცია, ენერგეტიკა, სოფლის მეურნეობა და მრეწველობა - აი, რა წარმოადგენს მტკნარი წყლის მსოფლიო რესურსების კატასტროფული შემცირების უმთავრეს მიზეზებს. ორ-სამ ათეულ წელიწადში ბუნებრივი წარმოშობის წყარო ჩვენს პლანეტაზე განსაკუთრებულად დეფიციტური გახდება. მუდმივად მზარდი გაუწმენდავი ჩამდინარე წყლების მოცულობა არსებითად გადააჭარბებს მათი თვითგაწმენდის ბუნებრივ პოტენციალს. ყველა კონტინენტზე არსებობს ქვეყნები, რომელთაც სასმელი წყლის განსაზღვრული მარაგი გააჩნიათ, თუმცა არსებობს ისეთი ქვეყნებიც, რომელთაც არ გააჩნიათ არავითარი მტკნარი წყლის წყაროები, რაც ხშირად სერიოზული საერთაშორისო კონფლიქტების საგანი ხდება.

წყალი, როგორც აღნიშნული იყო, წარმოადგენს ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს სასიცოცხლო კომპონენტს. ყველა არაჰალოფილური ორგანიზმისთვის და სამრეწველო პროცესთა უმრავლეს-

სობისთვის საჭიროა მტკნარი წყალი, რომლის ნაკლებობა უკვე წარმოადგენს მწვავე დეფიციტს, რაც განსაკუთრებით იგრძნობა სულ ცოტა 40 ქვეყანაში, რომელთაც მთელი მსოფლიოს ხმელეთის ფართობის დაახლოებით 60% უკავიათ [37, 38].

მტკნარი წყლის წლიური ხარჯი დაახლოებით 120-150 მილიონად მ³-ს შეადგენს. მტკნარი წყლის ნაკლებობა სულ უფრო მკვეთრად იგრძნობა მოსახლეობის რაოდენობის არაპროგნოზირებად ზრდასთან ერთად, რაც 20-30 წლის შემდეგ აუცილებლად განსაკუთრებით სერიოზულ პრობლემებს წარმოშობს. ამ ნაწილობრივი დეფიციტის აღმოსაფხვრელად ყველაზე რეალურია მასშტაბური, ეკონომიკურად მისაღები ტექნოლოგიები ზღვის წყლის გასამტკნარებლად.

მარილის შემცველობის მიხედვით, წყალს ყოფენ შემდეგ კატეგორიებად: ყველაზე მლაშეა ოკეანის წყალი, რომლის 1 ლიტრიც 10-დან 35 გრამამდე მარილს შეიცავს (ძირითადად, ოკეანის წყალი, საშუალოდ დაახლოებით 30-35 გრამ მარილს შეიცავს ერთ ლიტრ წყალზე); ნაკლებად მლაშე წყლის, მაგალითად, ტბების, მდინარეების და მიწისქვეშა წყლების უმრავლესობა ხასიათდება 1 ლიტრ წყალში 2-დან 10 გრამამდე მარილის შემცველობით. სულ სხვა მდგომარეობაა სასმელად ვარგისი მტკნარი წყლის მარაგთან დაკავშირებით, რომელიც 1 გრამზე ნაკლებ მარილს უნდა შეიცავდეს ერთ ლიტრზე. ამ კატეგორიის წყლის რაოდენობა შეადგენს საერთო მოცულობის მხოლოდ 2%-ს. მტკნარი წყლის მარაგი წარმოადგენს ყველაზე მნიშვნელოვან და რთულ პრობლემას, რაც განსაკუთრებულ ყურადღებას მოითხოვს. სუფრის მარილის (NaCl) გარდა წყლის ძირითადი კომპონენტებია კატიონები (K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺), ჰალოგენიდ-ანიონები და სულფატ-იონები. ზოგიერთი მათგანს, მაგალითად, ბრომს და იოდს სამრეწველო მასშტაბით ზღვის წყლიდან იღებენ. ამით არ ამოიწურება ზღვის წყალში ქიმიური ნაერთების და სხვა ცალკეული ელემენტების შემცველობა, რომელთა შორის, მათი შემცველობის რაოდენობის მიხედვით, შეიძლება გამოიყოს ფოსფორი, რუბიდიუმი, რკინა და თუთია. სულ უფრო პოპულარული ხდება წყლის გაწმენდა ნანოფილტრაციის, ფოტოკატალიზის და ჰიდროტალღური მეთოდის ტექნოლოგიებით.

წყლის გაწმენდის ცნობილი ტექნოლოგია - ნანოფილტრაცია თავის უნივერსალობით გამოირჩევა [111]. იგი მავნე რეაგენტების გამოყენების გარეშე შესაძლებელს ხდის გააუფერულოს ორგანული მინარევები და მოაცილოს წყალს ჰალოგენები. ეს ტექნოლოგია ეფექტიანია ქლორის ნარჩენების მოსაშორებლად, თუმცა მოითხოვს მრავალსაფეხურიანი გაწმენდის ტექნოლოგიის გამოყენებას. ტექნოლოგიური პროცესი ითვალისწინებს სხვადასხვა დიამეტრის ფილტრების გამოყენებას და კოაგულაციას. იმის გათვალისწინებით, რომ სასმელი წყლის სისუფთავეს განსაკუთრებული მოთხოვნები წაყენება, ფილტრაციამდე იყენებენ ულტრაფილტრაციულ დანდაგარებს. ნანოფილტრაცია წარმოადგენს წყლის გაწმენდის ძვირად ღირებულ ტექნოლოგიურ ეტაპს და მხოლოდ სპეციალური დანიშნულების შემთხვევებში გამოიყენება.

კიდევ ერთი ახალი ტექნოლოგიური სიახლეა რულონის აპარატი [112, 113]. ამ ხელსაწყოში წყლის ნაკადის სიჩქარის საშუალებით ნაღვექი წარმოიქმნება. მთელ ნაღვექს, რომელიც მინარევებისგან შედგება, მემბრანა აკავებს. ამ ტექნოლოგიის დადებით მხარედ შეიძლება ჩაითვალოს წნევის რეგულირებისა და წყლის ნაკადის სიჩქარის კორექციის შესაძლებლობა. თუმცა უნდა ითქვას, რომ ეს ტექნოლოგია ყოველთვის სასურველ შედეგს არ იძლევა, მაგალითად, დარიშხანის მინარევის მოსაცილებლად წყლის გაწმენდა მხოლოდ ასეთ დანადგარზე არ არის საკმარისი.

ზღვის წყალი მუდმივ კონტაქტშია ხმელეთთან, რაც იწვევს ზღვისთვის არადამახასიათებელი ორგანული და არაორგანული ნაერთებით ზღვის წყლის გაბინძურებას. ამასთან დაკავშირებით, ზღვის წყალი სხვადასხვა რეგიონში განსხვავდება ქიმიური შედგენილობით. გარდა ამისა, ზღვის წყლის შედგენილობაზე გავლენას ახდენს ზღვაში ჩამდინარე მდინარეების მიერ ჩატანილი უცხო ნაერთები, ნავთობის გადამზიდი ტანკერების ხშირი ავარიები და სხვ. ზღვის წყლის შედგენილობაზე მთელი რიგ რეგიონებში ასევე გასათვალისწინებელია ზღვის ფსკერზე დალექილი ვულკანური წარმოშობის ნივთიერებები. ზღვის წყლის მუდმივად ცვალებადი ქიმიური შედგენილობა არსებითად მოქმედებს ოკეანეში

მყოფ მრავალი სახის მლაშე წყლის მოყვარულ ორგანიზმზე.

ცნობილია პრაქტიკაში ხშირად გამოყენებული წყლის გამტკნარების ქიმიური ელექტროდიალიზის ტექნოლოგია, იონცვლადი ტექნოლოგიები, ფიზიკური და ფიზიკურ-ქიმიური ტექნოლოგიების სხვადასხვა კომბინაციები.

ცნობილია აგრეთვე ულტრაიისფერი სხივებით წყლის დამუშავების მეთოდი, რომელიც შედარებით იშვიათად გამოიყენება წყალში მარილების დაბალი კონცენტრაციების შემთხვევაში [37, 100]. ორგანული ნაერთების დიდი რაოდენობით არსებობა, რიგ შემთხვევებში, არსებითად ზღუდავს ამ მეთოდის გამოყენებას.

ასევე წყლის გაწმენდის საკმაოდ გავრცელებულია იონმიმოცვლის ტექნოლოგიები, რომლებიც წყლის დეიონიზაციისთვის გამოიყენება. წყლის ნაწილობრივი გამტკნარება მიიღწევა წყალში არსებული კალციუმის და მაგნიუმის იონების ნატრიუმის კატიონებით შეცვლით, რაც წყლის სიხისტეს ამცირებს. ამ პროცესში შესაბამისი იონმიმომცვლელი ფისების შერჩევა უზრუნველყოფს წყლის გამტკნარებას ყველა მაკრო და მიკროელემენტის მოცილებით.

მთელ რიგ შემთხვევებში, მაღალი გაბინძურების პირობებში, წყლის გაუმარილების გარდა, ჯეროვანი ყურადღება ეთმობა მის გასუფთავებას გარეშე მინარევებისგან. ამ მიზნით, როგორც წესი, იყენებენ წყლის დამუშავებას ქიმიური რეაგენტებით. წყლის გაბინძურების დონის მაჩვენებლიდან გამომდინარე, შერჩეული ქიმიკატები რეაქციაში შედის წყალში არსებულ მინარევებთან და გამოიყოფა ნალექის სახით. მინარევების გამოსაყოფად ასევე გამოიყენება სხვადასხვა ტიპის მყარი სორბენტები. მხედველობაში უნდა გვქონდეს, რომ რეაგენტები, რომლებითაც ამუშავებენ სასმელ წყალს, ერთი მხრივ, ამცირებს წყლის სიხისტეს, ხოლო მეორე მხრივ, არ არის აბსოლუტურად უვნებელი ადამიანის ჯანმრთელობისთვის. პრაქტიკული თვალსაზრისით ქიმიკატების გამოყენება ტექნოლოგიურად შედარებით ადვილია, ამიტომ ქიმიური რეაგენტებით წყლის დამუშავებას ხშირად უპირატესობა ენიჭება. სანიტარულ-ჰიგიენური მოთხოვნილებებიდან გამომდინარე, ქიმიკატების უმრავლესობის პრაქტიკულად ანტიმიკრობულ თვის-

სებებს უდავოდ დიდი მნიშვნელობა გააჩნია. წყლის ქიმიური დამუშავების ტექნოლოგიის შერჩევა ხდება გამაბინძურებელი ნივთიერების ტიპის და კონცენტრაციის მიხედვით. ეს წინასწარი ანალიზით უნდა დადგინდეს, რაც აუცილებელი პირობაა წყლის ქიმიური რეაგენტისგან გასაწმენდად.

სამრეწველო მასშტაბით დამუშავავად ყველაზე ხშირად იყენებენ შემდეგ ნივთიერებებს: ქანგბადს, ოზონს, კალიუმის პერმანგანატს, აირად ქლორს, ქლორის დიოქსიდს, წყალბადის პეროქსიდს. ყველა ნივთიერებას მისთვის დამახასიათებელი უპირატესობა გააჩნია. ცნობილია სხვადასხვა პარამეტრები ქიმიური დამუშავებების შესაფასებლად: წყლის მოცულობის ერთეულზე რეაგენტების საჭირო რაოდენობა, რეაქციის სრულფასოვნება, ნარჩენი კომპონენტების მოცილების სისრულე, რეაქციის განსახორციელებლად აუცილებელი დრო, პროცესების ღირებულება.

ხშირად დამუშავავ აგენტად ქანგბადს იყენებენ. ქანგბადის კონცენტრაცია გავლენას ახდენს წყლის ხარისხზე, ამიტომ წყლის გასუფთავებისას, მასში გახსნილი ქანგბადის რაოდენობა სისტემატურად უნდა მოწმდებოდეს. ქანგბადის გარდა, გამოყენებულ წყალში უნდა კონტროლდებოდეს ექვსვალენტიანი ქრომი, რომელიც მიეკუთვნება ალერგიულ ნივთიერებებს და მისი მოცილება უნდა მოხდეს ნებისმიერი მიზნით გამოყენებული წყლიდან, წარმოადგენს აბსოლუტურად აუცილებელ პირობას.

ბუნებრივ ან გადამუშავებულ წყალში ნატრიუმის, კალიუმის, კალციუმის და მაგნიუმის მარილების გარდა ხშირად შედის: რკინის, ალუმინის, ბორის მარილები. სასმელი წყლისთვის რკინის ნაერთების მოცილება ასევე აუცილებელი პირობაა. ამ მიზნით საკმაოდ ეფექტანია ქიმიურ დაქანგვაზე დაფუძნებული მეთოდები. რეაქცია მიმდინარეობს საკმაოდ სწრაფად და რკინა ოქსიდების სახით გამოილექება, რასაც ადვილად აცილებენ ფილტრაციით.

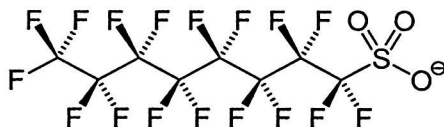
წყლის სანიტარულ-ჰიგიენურ დამუშავებას ძირითადად ქლორით აწარმოებენ. ეს რეაგენტი წყალში მოხვედრისას უზრუნველყოფს ბაქტერიების და ვირუსების მოსპობას და წყლის ბიოლოგიური დეზინფექციის თვალსაზრისით ყველაზე გავრცელებული საშუალებაა. ამასთან, უნდა აღინიშნოს, რომ ქლორი ტოქსიკური

ნივთიერებაა და მისი ტრანსპორტირება, შენახვა და გამოყენება მოითხოვს უსაფრთხოების განსაკუთრებული წესების დაცვას. ქლორს ახასიათებს მოქმედების საკმაოდ ფართო სპექტრი. მის კონცენტრაციაზე დამოკიდებულებით, ქლორი მოქმედებს არა მარტო ბაქტერიებსა და ვირუსებზე, არამედ ნაწილობრივად ცვლის წყლის შედგენილობას. ქლორირებულ წყალში შეიძლება წარმოიქმნას ქლოროფორმი და ქლორფენოლი, რომლებიც წყალს უნდა მოსცილდეს. მრეწველობის რიგ დარგებში გამოყენებული ქლორის რაოდენობა დასაშვებია 2-დან 5 მილიგრამამდე 1 ლიტრ წყალში.

წყლის ოზონირების ტექნოლოგია ყველა სხვა ქიმიური ტექნოლოგიისგან იმით განსხვავდება, რომ გამოყენების არც ერთ ეტაპზე არ ახდენს ტოქსიკურ ან სხვა სახის გავლენას წყლის ქიმიურ შედგენილობაზე. წყლის დამუშავებიდან დაახლოებით ერთი საათის შემდეგ ოზონი წყლის ზედაპირიდან ორთქლდება. ეს კარგად აპრობირებული, ეკოლოგიურად უვნებელი ტექნოლოგია მოითხოვს დიდი მოცულობის ტექნოლოგიურ დანადგარებს, რომელთა ტრანსპორტირება და მონტაჟი დაკავშირებულია გარკვეულ სირთულეებთან. მიუხედავად ამისა, წყლის გასუფთავების კლასიკური, ტრადიციული ქიმიური მეთოდები (ქლორირება, ოზონირება) დღეს პრაქტიკაში აქტიურად გამოიყენება.

მრეწველობის ახალი დარგების განვითარებამ გამოიწვია გარემოს გამაბინძურებელი ბევრი ახალი ქიმიური ნაერთის წარმოშობა, რის გამოც მსოფლიოს ზოგიერთ რეგიონში, სასმელ წყალში ახალი უჩვეულო ნივთიერებები შეინიშნება, როგორებიცაა, მაგალითად, პერფთოროქტანმჟავა, პოლიფთორალკილნაერთები, პოლიქლორირებული ბიფენილები, ამონიუმის იონები, მძიმე მეტალები მომატებული რაოდენობით, კერძოდ, ექვსვალენტიაჩი ქრომის შემცველი იონები, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები, კვალის სახით ახალი ფარმაცევტული და ვეტერინარული პრეპარატები, ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებათა ახალი ფორმები, ახალი პესტიციდები და სხვა ნივთიერებები, რომელთა არსებობა წყალში ადრე არ შეინიშნებოდა.

ბოლო პერიოდში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა პე-რფთოროქტანსულფონმჟავას (პფოს) (ნახ. 28).



ნახ. 28. პფოს-ის ანიონის სტრუქტურა

პფოს-ის მოლეკულაში ქიმიური ბმები მტკიცეა, რაც განაპი-რობებს ამ ნივთიერების მაღალ სტაბილურობას. ამიტომ, წყალში მოხვედრისას, პფოს-ის ანიონი პრაქტიკულად არ განიცდის ბი-ოტურ და აბიოტურ გარდაქმნებს. პფოს-ს გაცილებით უფრო მა-ღალი ზედაპირული აქტიურობა აქვს, ვიდრე შესაბამის ნახშირ-წყალბადოვან ანალოგებს, რაც პფოს-ს გარემოში სწრაფი გავრცე-ლების საშუალებას აძლევს. მისი მოლეკულები სწრაფად იჭრება ცოცხალ ორგანიზმებში, ადვილად გადის მემბრანულ ბარიერებს და დიდი რაოდენობით ბიოაკუმულირდება. მრავალრიცხოვანი მონაცემებით დადგენილია პფოს-ის კანცეროგენური თვისებები. ორგანიზმში მოხვედრისას პფოს იწვევს ენდოკრინულ დარღვე-ვებს, იმუნური სისტემის მკვეთრად დაქვეითებას, ზრდისა და ფიზიკური განვითარების შეფერხებას. გარემოდან მის მოსაცი-ლებლად აუცილებელია სპეციალური ტექნოლოგიების გამოყე-ნება [101, 112, 113, 114].

ამგვარად, არსებობს წყლის გაწმენდის მრავალრიცხოვანი მე-თოდები, რომელთა ტექნოლოგიური პრინციპები ეფუძნება ქი-მიურ რეაქციებს, რომლებიც აუცილებელია წყალში არსებული ნივთიერებების სრული ან მნიშვნელოვანი დეტოქსიკაციისათვის. ამ რეაგენტების მოქმედების შედეგად გაბინძურებული წყლის არასასურველი კომპონენტები ხშირად ილექება და ფილტრაციის შედეგად ადვილად მოსაცილებელი ხდება.

ქიმიური ტექნოლოგიები შესაძლებლობას იძლევა, შერჩევი-თად მოაცილოს წყალს არასასურველი ქიმიური კომპონენტები,

მაგალითად, კატიონები, რომლებიც წყლის სიხისტეს იწვევს; რკინის იონები, რომლებიც გახსნილ მდგომარეობაშია; ორგანულ ნივთიერებათა ფართო სპექტრი; ხსნადი აირები (მაგალითად, ქლორი); სილიციუმის შემცველი იონები; სხვადასხვა ანიონები (ქლორიდები, სულფატები, ნიტრატები და ნიტრიტები); ბაქტერიები და ვირუსები – ფაქტობრივად, ყველა ის კომპონენტი, რომლებიც ადამიანის ჯანმრთელობისთვის საშიშროებას წარმოადგენს. ამიტომ წყლის გაწმენდის ქიმიური ტექნოლოგიები ყველაზე უფრო მასშტაბურად გამოიყენება.

ძლიერ გაბინძურებული წყლის გაწმენდის პირველ ეტაპებზე ფართო გამოყენებას პოულობს ეკოლოგიური ბიო- (მიკროორგანიზმებით), ფიკო- (წყალმცენარეებით) და ფიტო- (წყლის მცენარეებით) ტექნოლოგიები.

წყლის გარემოში მიკროორგანიზმები აქტიურად ახორციელებენ ანთროპოგენურ გამბინძურებელთა დეგრადაციას. გაბინძურებული წყლის ბიოლოგიური გაწმენდის პროცესი, გამაბინძურებელი კომპონენტის სტრუქტურასა და სტაბილურობაზე დამოკიდებულებით, შეიძლება რამდენიმე დღე გაგრძელდეს. მიკროორგანიზმების ფართო დეგრადაციული უნარის მიუხედავად, ბიოლოგიური ტექნოლოგიების ეფექტიანობის მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს მიკროორგანიზმების (ბაქტერიები, იშვიათად მიცელიალური სოკოები) სელექციურად შერჩეული აქტიური შტამების გამოყენება. წყლის ასეთი დამუშავება წარმოადგენს გასუფთავების პირველ ეტაპს, რომლის დროსაც ადგილი აქვს წყალში არსებული ანთროპოგენური ნივთიერებების ნაწილობრივ ან სრულ დეგრადაციას. ამ პროცესის შემდგომი ეტაპი ხშირად არის ხსნარის ფილტრაცია და შემდგომი დამუშავება სხვა მეთოდით. მრეწველობის განვითარებასთან ერთად, წყლის გაწმენდა ბიოლოგიური ტექნოლოგიებით სულ უფრო ფართო გამოყენებას პოულობს.

სასმელი წყლის მარაგები წყლის რესურსების გაბინძურების არსებული ტემპის პირობებში, მოსახლეობის ზრდასთან დაკავშირებით (120 მილიონი წელიწადში) მუდმივად მცირდება და მთელი პლანეტის მასშტაბით მისი კრიტიკულ მინიმუმამდე ამოწურვის ვადა რეალურად რამდენიმე ათეულ წელს შეადგენს (ცხრილი 4).

ცხრილი 4. სასმელი წყლის ამოწურვის ვადები სხვადასხვა რეგიონში 2022 წლის მონაცემებით

კონტინენტი	მტკნარი წყლის გაბინძურების მარაგები მლრდ/მ ³	მტკნარი წყლის საერთო ხელმისაწვდომი მარაგები, მლრდ/მ ³	სუფთა სასმელი წყლის ამოწურვის სავარაუდო ვადა, წელი
ჩრდილოეთ ამერიკა	154,4	6799,1	44
ლათინური ამერიკა	136	18293,4	134,5
ევროპა	126,1	8070,5	64
აზია	1240,2	11881,7	9,6
ოკეანეთი	222,9	3667,6	16,5

ამ ცხრილის მონაცემები არ მიუთითებს ცალკეული ქვეყნების წყლის რესურსების დონეზე. არის ქვეყნები, რომლებიც განიცდის სასმელი წყლის მწვავე უკმარისობას (კუვეიტი, პაკისტანი, სირია, სუდანი, ავღანეთი, სომალი და სხვ.). უაღრესად დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ბუნებრივი, სასმელად გამოსადაგი წყლის სუფთა წყაროების შენარჩუნებას, რაც დაკავშირებულია მთელი პლანეტის გარემოს პრობლემებთან. ამასთან ერთად, მოსახლეობის კეთილდღეობის ერთ-ერთი მთავარი პრობლემაა ზღვის წყლის გამტკნარების და ჩამდინარე წყლების გასუფთავების იაფი და მასშტაბური ტექნოლოგიების დამუშავება.

3.4.2. ნიადაგი

ნიადაგი, წყალთან შედარებით, ბევრად უფრო მრავალკომპონენტია, აქტიურად მოქმედი სისტემაა, რომელიც სიცოცხლისუნარიან ორგანიზმთა დიდ ნაკრებს შეიცავს.

ნორმალური ნიადაგებისთვის დამახასიათებელია სხვადასხვა ქიმიური კომპონენტების და ორგანიზმების არსებობა: წყალი, მეტალთა იონები, დაბალ და მაღალმოლეკულური ორგანული ნაე-

რთები (ცილები, პოლისაქარიდები, ნუკლეინის მჟავები); სხვადასხვა სახის კოლოიდები; მარილები, მიკროფლორა და ა.შ. ნიადაგის ორგანიზმები ქიმიურ ნაწილთან ერთად განსაზღვრავს ნიადაგის ქიმიურ/ბიოლოგიურ და ეკოლოგიურ პოტენციალს, რაც მცენარეთა ზრდასა და მოსავლიანობას უზრუნველყოფს.

ნიადაგი კოლოიდური ბუნების გამო ადვილად და ხანგრძლივად ახდენს თავის სტრუქტურაში ბიოლოგიური წონასწორობის დამრღვევი თითქმის ნებისმიერი ანთროპოგენური ფაქტორის აკუმულირებას [115].

ნებისმიერი სამრეწველო დაწესებულება, რომელიც იმყოფება სასოფლო-სამეურნეო სავარგულებთან ახლოს, უკიდურესად უარყოფითად მოქმედებს ნიადაგში მიმდინარე ბუნებრივ პროცესებზე, რის შედეგად ნიადაგი გარდაიქმნება ნაკლებად გამოსადეგ ან საერთოდ გამოუსადეგ არეალად. ამ დარღვევათა მიზეზების გამოვლენა და მათ აღმოსაფხვრელად (რემედიაციისთვის) შესაბამისი ღონისძიებების გატარება თანამედროვე აგრარული ეკოლოგიური მეცნიერების უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს.

სწორედ ამ პრობლემას ემსახურება ნიადაგის რემედიაციის ყველა ეკოლოგიური ტექნოლოგია, რომლის დანიშნულებაცაა ბუნებრივი ბალანსის დამრღვევი, ქვემოთ ჩამოთვლილი ფაქტორების მაქსიმალურად შემცირება [116-117]:

- ნიადაგის გაბინძურება სხვადასხვა აგრეგატული მდგომარეობის (მყარი, თხევადი, აირადი) მქონე გამაბინძურებლებით, რომელთა შედგენილობაში შედის ორგანული ნაერთები, მძიმე მეტალები, ნახშირბადის, აზოტის, გოგირდის ოქსიდები, ნახშირწყალბადები, პესტიციდები, ფეთქებადი ნაერთები და მრავალი სხვა ანთროპოგენური, ტექნოგენური ტოქსიკური ნაერთი;
- ტრადიციული ან ახალი აგროქიმიკატების (ორგანული და არაორგანული სასუქები, პესტიციდები) ჭარბი გამოყენება ან არასრული შეთვისება ნიადაგის მიერ;
- ნავთობის მოპოვების პროცესში ნაწილობრივ ტრანსფორმირებული და ნიადაგში ღრმად დაღექილი ნახშირწყალბადები და სხვა ნავთობპროდუქტები;
- ენერგორესურსების (ბუნებრივი აირი, ნავთობპროდუქტები, ქვანახშირი, ტორფი, ფიქალები და სხვ.) წვის პრო-

ცესში დიდი რაოდენობის გამოყოფილი ტოქსიკური ნაერთები.

გარდა ამისა, არსებობს სხვა ფაქტორებიც, რომლებიც ასევე იწვევს ნიადაგის გაბინძურებას და, შესაბამისად, ეროზიას და გაუდაბნოებას. ყოველივე ამის გამო საკმაოდ ინტენსიურად მიმდინარეობს ნიადაგის ნაყოფიერების შემცირება.

საველე პირობებში ნიადაგის გაწმენდის ელექტროქიმიური ტექნოლოგია გამოიყენება არადამახასიათებელ ტოქსიკურ ნაერთთა, ნავთობპროდუქტების და სხვა ორგანულ ტოქსიკური ბუნების მქონე ნაერთთა მოსაცილებლად [118-120]. ამ დროს ადგილი აქვს ორგანული გამაბინძურებელი ნივთიერების ნაწილობრივ ან სრულ მინერალიზაციას. ასეთი ტექნოლოგია ითვალისწინებს ნიადაგში სპეციალურად კონსტრუირებული ელექტროდებიანი დანადგარის დამონტაჟებას. ეს ოპერაცია იწვევს ნიადაგში არსებული წყალხსნარის ელექტროლიზს და მისგან ისეთი ტოქსიკური ნივთიერებების, როგორცაა ციანიდების მოცილებას. ნიადაგის გაწმენდის მაღალი ეფექტიანობის მიუხედავად, ეს ტექნოლოგია ტექნიკურად ძნელად შესრულებადია, რადგან ელექტროენერგიის დანახარჯთან ერთად მოითხოვს სპეციალურ დანადგარებს, რის გამოც მხოლოდ განსაზღვრულ შემთხვევებში გამოიყენება.

ნიადაგის რემედიაციის ქიმიური ტექნოლოგიები არსებითად განსხვავდება ფიზიკურ ტექნოლოგიებისგან. ქიმიური ტექნოლოგიები ძირითადად დაფუძნებულია სხვადასხვა ქიმიური ნაერთის მოქმედებაზე, დაშალოს ან დაიკავშიროს გამაბინძურებული ნივთიერება. პირველ რიგში, უნდა აღინიშნოს ქიმიური დამჟანგავი აგენტები (პეროქსიდები, ცვალებადვალენტთან მეტალთა იონები), რომელთაც შეუძლია განახორციელოს ორგანული გამაბინძურებელი ნივთიერების, მაგალითად, ნავთობის ნახშირწყალბადების, პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადების ჟანგვითი დეგრადაცია. ამავე მიზნით გამოიყენება ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებები, რომელთაც შეუძლია ტოქსიკური ნივთიერების და სხვა არასასურველი ნივთიერებების მოცილება ნიადაგიდან. სხვა ტექნოლოგიებში გამოიყენება რეაგენტები, რომლებიც იწვევს მძიმე მეტალების და რადიონუკლიდების იონების დალექვას უხსნადი ნაერთების (მაგალითად, ჰიდროქსიდების და კარბონატების) სახით. ქიმიური ტექნოლოგიები ასევე ითვალისწინებს ნიადაგში

გამაბინძურებელ ნივთიერებებთან არატოქსიკური კომპლექსების წარმომქმნელი ნივთიერებების დამატებას, მაგალითად, მძიმე მეტალებით გამაბინძურებულ ნიადაგის კომპლექსწარმომქმნელებით დამუშავებას. ციანიდების, ნიტრატების, ტეტრაქლორიდების იმობილიზაციას ახორციელებენ ცემენტზე, ნაცარზე, ნატრიუმის და კალიუმის სილიკატებზე, ბენტონიტზე და ცელულოზაზე.

3.5. მიკროორგანიზმების და მცენარეების მოქმედებაზე დაფუძნებული ინოვაციური ტექნოლოგიები

ადამიანი მუდმივად დაკავშირებულია გარემოსთან საკვებით, წყლით, ჰაერით და მზის ენერგიით, რომლებიც როგორც თვისებრივად, ისე რაოდენობრივად განსაზღვრავს მის ყოველგვარ ფიზიოლოგიურ ცვლილებას. კიდევ ერთი უხილავი კავშირი ადამიანსა და ბუნებას შორის მცენარეებთან ურთიერთობაში მდგომარეობს. სწორედ ეს კავშირი ასრულებს მნიშვნელოვან როლს არა მარტო ადამიანის, არამედ პლანეტაზე სიცოცხლის არსებობაში. ეს არის მცენარის მონაწილეობა ისეთ სასიცოცხლო მნიშვნელობის პროცესებში, როგორებიცაა ფოტოსინთეზი, მოლეკულური აზოტის ფიქსაცია და ასიმილაცია, მოსავლის მიღება და მრავალი სხვა, რომელთა გარეშე სიცოცხლე შეუძლებელი იქნებოდა დედამიწაზე [120-122].

არ შეიძლება არ გავიხსენოთ მცენარეების ისტორიული როლი ადამიანის ცხოვრებაში. მცენარე ტრადიციულად გამოიყენება, როგორც მასალა (სახლები, ავეჯი, ქაღალდი, ბოჭკოები, ტანსაცმელი, იარაღი). მრავალწლიანი ხეების მერქანი, როგორც ენერგიის წყარო, უძველესი დროიდან ხელს უწყობდა ჩვენი წინაპრების გადარჩენას [123-124].

გაკულტურებული მცენარეები იძლევა მოსავალს, რომლის გარეშე, წარმოდგენილია ადამიანის ცხოვრება. მცენარეები, ნიადაგის მიკროფლორასთან და ნიადაგის სხვა ორგანიზმებთან ერთად, ქმნის ნიადაგის ნაყოფიერებისთვის განსაკუთრებულ პირობებს.

როგორც სიცოცხლის უნიკალურ ფორმას, მცენარეებს ახასიათებს ნივთიერებათა ცვლის თვისებური მეტაბოლიტური გარდაქმნები, რაც აისახება სხვადასხვაგვარი სუბსტრატების კონვერსიით

დიდი რაოდენობის მეორეული მეტაბოლიტების, ძირითადად, დაბალმოლეკულური ნაერთების სინთეზში [125, 126].

ცნობილია, რომ მცენარეთა ყველა ფუნქციური აქტიურობა მათთვის ოპტიმალურ კლიმატურ პირობებში ვლინდება. სწორედ ამ ფაქტორებით არის გამოწვეული მცენარეთა ინტენსიური ზრდა-განვითარება პლანეტის ხელსაყრელ ტროპიკულ და სუბტროპიკულ ზონებში, თუმცა მცენარის მრავალმხრივი სასარგებლო ქმედება, სხვა ზონებში და, კერძოდ, ჩრდილოეთშიც საკმაოდ მრავალმხრივია [127-128].

მცენარე, ნებისმიერ ნიადაგობრივ-კლიმატურ პირობებში, რომლებიც უზრუნველყოფს მათ ზრდასა და განვითარებას, ინარჩუნებს უნიკალურ მეტაბოლიტურ აქტიურობას, რაც განპირობებულია მცენარის სახეობის და რეგიონალურ ნიადაგობრივ-კლიმატური პირობებით.

ყოველივე ზემოთქმულით არ ამოიწურება მცენარეთა წვლილი კაცობრიობის სასიცოცხლო პირობების უზრუნველყოფაში. უკანასკნელი 3-4 ათწლეულის განმავლობაში კვლევებმა და პრაქტიკამ გამოავლინა მცენარეთა კიდევ ერთი უნიკალური უნარი, რაც მდგომარეობს ტოქსიკურ ორგანულ ნაერთთა შეთვისებასა და ასიმिलირებაში და, რაც შემთხვევაში, მათ მინერალიზებაში, ძირითადად წყლად და ნახშირორჟანგად დაშლაში [92, 129-131].

მცენარეთა უნიკალურობა იმაშიც მდგომარეობს, რომ ისინი, სხვა ორგანიზმებისგან განსხვავებით, წარმოადგენენ უნივერსალურ დეტოქსიკატორებს, რომლებიც ახორციელებენ როგორც ბუნებრივი, ისე მთელი რიგი ანთროპოგენური ტოქსიკური ნივთიერებების დეგრადაციას სტანდარტულ უჯრედულ მეტაბოლიტებამდე, რითაც ასუფთავებენ გარემოს ძირითად კომპონენტებს: ნიადაგს, წყალსა და ჰაერს.

ცალკე მსჯელობის საგანია, თუ რა ჯდება ეკოლოგიური ბალანსის შენარჩუნება [132]. პლანეტის პერმანენტულად მზარდი ეკოლოგიური გაბინძურებიდან გამომდინარე, ეს ღირებულება მუდმივად იზრდება და ავტორთა გათვლებით თანამედროვე პირობებში, როგორც მინიმუმ, ყოველწლიურად არანაკლებ 80 მილიარდ ამერიკულ დოლარს შეადგენს. ეს იმას არ ნიშნავს, რომ ამ

ღონისძიებებით მოხერხდება გარემოში არსებულ უცხო ნაერთთა უმრავლესობის გაუვნებელყოფა. ამ პროგნოზირებულად მზარდი პროცესის შესაჩერებლად, გარემოზე ტოქსიკური ფაქტორების უკიდურესად უარყოფითი გავლენის შესამცირებლად აუცილებელია დედამიწის მთელი ხმელეთის მნიშვნელოვან ნაწილში გლობალური, ინოვაციური ტექნოლოგიების გამოყენება.

3.5.1. მცენარე - ტოქსიკურ ნაერთთა დეტოქსიფიკატორი

უკანასკნელი ათწლეულების განმავლობაში მნიშვნელოვნად გაიზარდა ინტერესი ეკოლოგიური ტექნოლოგიებისადმი, რომელთა შორის სულ უფრო დიდი ყურადღება ეთმობა გარემოს დაცვის ბიოლოგიურ შესაძლებლობებს. ამასთან დაკავშირებით, მიკროორგანიზმების ეკოლოგიური პოტენციალი, რომელიც მიმართულია ტოქსიკურ ნაერთთა დეგრადაციისკენ, გადაიქცა რეალურად არსებულ ტექნოლოგიად. მცენარე დღემდე განიხილებოდა როგორც ორგანიზმი, რომელსაც ტოქსიკურ ნაერთთა შთანთქმის და შიგაუჯრედულ მოცულობაში აკუმულირების უნარი შესწევს [85, 122, 123, 129]. მცენარეები მნიშვნელოვნად განსხვავდება ერთმანეთისგან დეტოქსიკაციური პოტენციალით, ისინი სხვადასხვა ინტენსივობით და სპეციფიკურობით ახორციელებენ ტოქსიკური ნაერთების დეტოქსიკაციურ პროცესებს. ამ მაჩვენებლით ახდენენ მათ კლასიფიკაციას ძლიერ, საშუალო და მცირედ აქტიურ ეკოლოგიურ აგენტებად. ეს მიუთითებს მცენარეების საშუალებით გლობალური ეკოლოგიური ბალანსის შესაძლო დაცვის მასშტაბებზე [85, 50].

ბოლო ათწლეულებში შესრულებულია დიდძალი კვლევები მცენარეებისთვის დამახასიათებელი დეტოქსიკაციის მექანიზმების გამოსავლენად. ამით ყალიბდება სრულიად ახალი პერსპექტივები ეკოლოგიურად სუფთა ინოვაციური ბიოტექნოლოგიების შესაქმნელად, რომელთა გამოყენებით შესაძლებელი გახდება ყველა ეკოსისტემის გასუფთავება, გაკეთილშობილება და ბუნებრივი პირობებისადმი მაქსიმალურად მიახლოება.

მე-6 ცხრილში ჩამოთვლილია მცენარეები, რომლებიც რეკომენდებულია ფიტორემედიაციაზე დაფუძნებული ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიების რეალიზაციისთვის. ცხადია, ეს არ არის ამომწურავი სია.

ცხრილი 5. ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიისთვის რეკომენდებული მცენარეთა ჩამონათვალი

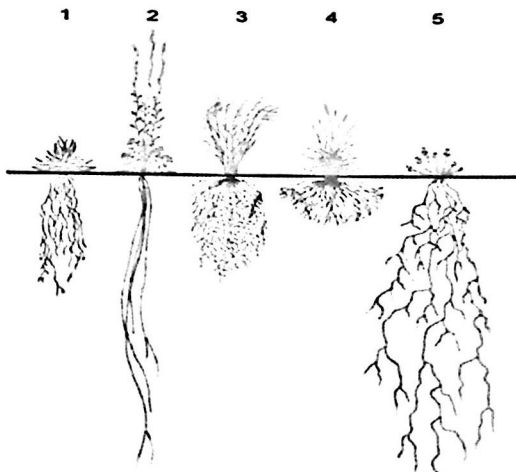
ბალახები და ბალახოვანი მცენარეები
კაპუეტა (<i>Agropyron smithii</i>)
წვერიანი ურო (<i>Andropogon gerardii</i>)
ბუტელუა დახრილი (<i>Bouteloua curtipendula</i>)
თალგამი (<i>Brassica rapa</i>)
მსუქანი მაცვალი (<i>Buchloe dactyloides</i>)
გლერტა (<i>Cynodon dactylon</i>)
მეწამური ექინაცეა (<i>Echinacea purpurea</i>)
კანადური ელიმუსი (<i>Elymus canadensis</i>)
ლერწმისებური წივანა (<i>Festuca arundinacea</i>)
მზესუმზირა (<i>Helianthus annuus</i>)
იტალიური კონდარი (<i>Lolium multiflorum</i>)
ინგლისური კონდარი (<i>Lolium perenne</i>)
კურდღლისფრჩხილა (<i>Lotus corniculatus</i>)
იონჯა (<i>Medicago savita</i>)
წკეპლისებრი ფეტვი (<i>Panicum virgatum</i>)
ჩვეულბრივი ჭვავი (<i>Secale cereale</i>)
ოქროსჯობა (<i>Coldenrods</i>)
ორფერი სორგო (<i>Sorghum bicolor</i>)
სუდანური ბალახი (ჰიბრიდი) (<i>Sorghum × drummondii</i>)

მერქნოვანი მცენარეები:
შავი არყი (<i>Betula nigra</i>)
გვინეის დიკორინია (<i>Dicorynia guianensis</i>)
ეპერუას ნამგალი (<i>Eperua falcata</i>)
ევკალიპტი (<i>Eucalyptus camadulensis</i>)
წითელი თუთა (<i>Morus rubra</i>)
საკმეველის ფიჭვი (<i>Pinus taeda</i>)
ვერხვი (<i>Populus sp.</i>)
კანადური ვერხვი (<i>Populus deltoides</i>)
სამხრეთის მუხა (<i>Quercus virginiana</i>)
თეთრი წნორი (<i>Salix alba</i>)
ჭაობის კვიპაროზი (<i>Taxodium distichum</i>)
წყლის და ჭაობის მცენარეები:
ისლი (<i>Carex comosa</i>)
მომწვანო ისლი (<i>Carex comosa</i>)
პელტანდრა (<i>Peltandra virginica</i>)
ლერწმისებური ჩიტისფეტვა (<i>Phalaris arundinacea</i>)
ლელქაში (<i>Scirpus sp.</i>)
ჭაობის ლელქაში (<i>Scirpus lacutus</i>)
მდინარის ლელქაში (<i>Scirpus fluviatilis</i>)
კურდღლისცოცხა (<i>Spartina pectinata</i>)
ლაქაში (<i>Typha x glauca</i>)

მცენარეთა ყველა ზემოჩამოთვლილ, გენეტიკურად დეტერმინებულ თვისებას თუ დავამატებთ უნიკალურ, სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვან დეტოქსიკაციურ ფუნქციას, ნათელი გახდება, რომ მცენარე ცოცხალი სამყაროს განსაკუთრებულ, უმნიშვნელოვანეს ნაწილს წარმოადგენს [50, 85, 133].

მცენარეთა უნარი, განახორციელოს ბუნებისთვის უცხო, მათ შორის, ტოქსიკურ ნაერთთა დეგრადაცია, გარდაიქმნება გლობალური ხასიათის ეკოლოგიურად მნიშვნელოვან ტექნოლოგიად [92, 98, 131, 133]. სხვადასხვა ეკოლოგიური ფიტოტექნოლოგიები, ისეთები როგორებიცაა: ფიტოექსტრაქცია, რიზოდეგრადაცია (მიკროორგანიზმების და მცენარეთა ერთობლივი კომბინირებული მოქმედება), ფიტოდეგრადაცია, ფიტოსტაბილიზაცია, რიზოფიტრაცია და სხვები, საკმაოდ ხშირად გამოიყენება პრაქტიკაში. ამ ტექნოლოგიების წარმატებული რეალიზაციის მნიშვნელოვანი ფაქტორია სელექციურად შერჩეული მცენარეები, რომლებიც აქტიურად ასიმილირებს და შლის ჰაერის, წყალსატევების და ნიადაგისთვის ტოქსიკური ბუნების მქონე უცხო ნაერთებს. ამ ტექნოლოგიათა შესაძლებლობანი, თავის მასშტაბით, მნიშვნელოვნად აღემატება ყველა ცნობილ ეკოლოგიურ ტექნოლოგიას, რომელთაც ძირითადად აქვს ლოკალური ხასიათი. ეს აიხსნება იმ აქამდე გაუთვალისწინებელი მცენარეთა უნარით, რომლებსაც გააჩნია კლიმატურ პირობებში განსხვავებული მოქმედება. მათ შეუძლიათ კარგად განვითარებული ფესვთა სისტემით, დიდი რაოდენობით ბიომასის დაგროვებით, სოლიდური შიგაუჯრედული მოცულობით, აქტიური ტრანსპირაციის ხარჯზე მოახდინონ ტოქსიკური ნაერთების შეთვისება და დეგრადაცია (ნახ. 29). ძირითადად, ეს და ზოგიერთი სხვა თვისება განაპირობებს მცენარეებში, ორგანული ტოქსიკანტების დეგრადაციის და მძიმე მეტალების და რადიონუკლიდების შთანთქმის შესაძლებლობას, რაც მცენარეთა ეკოლოგიურ პოტენციალს განსაზღვრავს.

ორი ათეული წელია ფართოდ განიხილება მცენარეთა მასშტაბურად გამოყენების შესაძლებლობა ნიადაგების, გრუნტების, გრუნტის წყლებისა და წყალსაცავების გასაწმენდად უცხო წარმოშობის ტოქსიკანტებისგან და სხვა ქსენობიოტიკებისგან.



1- ამორფა (*Amorpha canescens*); 2 - სილფიუმი (*Silphium laciniatum*); 3 - ვაციწვერა (*Hesperostipa spartea*); 4 - კეწეწურა (*Koeleria cristata*); 5 - ლიატრისი (*Liatris cylindracea*)

ნახ. 29. ზოგიერთი ბალახოვანი მცენარის ფესვთა სისტემა

მიკროორგანიზმები და მცენარეები, როგორც ცალ-ცალკე, ისე ერთად, მონაწილეობენ ბუნების ტოქსიკურ ნივთიერებათა წრებრუნვასა და რემედიაციაში. კერძოდ, ეს ორგანიზმები ახორციელებენ უცხო ნაერთთა ნახშირბადოვანი ჩონჩხის დეგრადაციას, ხოლო მათში შემავალ ნახშირბადის ატომებს უჯრედული მეტაბოლიტების სინთეზში იყენებენ. ისინი წარმოადგენენ იმ ბუნებრივ ფილტრს, რომლებიც არა მარტო ასუფთავებს გარემოს, არამედ ტოქსიკურ ნაერთთა შედგენილობაში მყოფ ატომებს ბუნებრივ წრებრუნვაში რთავენ. მიუხედავად მცენარეში წარმოებული პროცესების სირთულისა, სახეზეა უდავოდ ეკოლოგიურად უვნებელი დეტოქსიკაციური პროცესი, რომელშიც მონაწილეობენ რიზოსფერული მიკროორგანიზმები და მცენარეები, რომლებიც ყველა ნიადაგობრივ-კლიმატურ პირობებში ახორციელებენ ეკოსისტემებისთვის არადამახასიათებელ ტოქსიკურ ნაერთთა დეგრადაციას.

მე-6 ცხრილში მოცემულია მცენარეთა ჩამონათვალი, რომელთაც შეუძლია მიწისზედა ორგანოებით (ძირითადად, ფოთლებით) ისეთი სტაბილური მაღალტოქსიკური, კანცეროგენური ნაერთების ასიმილირება, როგორებიცაა ბენზოლი და ტოლუოლი. ცხრილის მონაცემებიდან ჩანს, რომ ზოგიერთ მცენარეს რეალურად მაღალი ფიტორემედიაციული პოტენციალი. როგორც ირკვევა მცენარისათვის მოახდინოს ტოქსიკურ და უცხო ნივთიერებათა ასიმილირება არა მარტო ნიადაგიდან, არამედ ჰაერიდანაც.

ცხრილი 6. მცენარეთა ფოთლების მიერ ატმოსფეროდან ბენზოლის და ტოლუოლის შთანქმის უნარი

მცენარეთა ჯგუფი	არომატული ნახშირწყალბადების შთანქმა 1 კგ ფოთლის მიერ 24 საათის განმავლობაში	მცენარეები	
1	2	3	
ძლიერი მშთანქმელები	1.0 - 10.0 მგ	<p>(<i>Acer campestre</i>) ნეკერჩხალი (<i>Eleagnus angustifolia</i>) ველური ფშატი (<i>Robina pseudoacacia</i>) თეთრი აკაცია ან ცრუ აკაცია (<i>Pyrus caucasica</i>) კავკასიური მსხალი (<i>Juglans regia</i>) ბერძნული კაკალი (<i>Amigdalus communis</i>) ნუშის ხე (<i>Cerasus avium</i>) ბალი (<i>Amorpha fruticosa</i>) ამორფა (<i>Cerasus vulgaris</i>) ალუბალი (<i>Cestanea sativa</i>) წაბლი</p>	<p>(<i>Malus domestica</i>) ვაშლი (<i>Zelcova caprinifolia</i>) ძელქვა (<i>Populus canadensis</i>) ვერხვი (<i>Lolim perene</i>) მრავალწლოვანი კოინდარი (<i>Siringa vulgaris</i>) იასამანი (<i>Salix</i>) მტირალა ტირიფი (<i>Catalpa bignonioides</i>) კატალპა (<i>Sophora japonica</i>) იაპონური სოფორა</p>

საშუალო მშთანთქმელები	0.1 - 1.0 მგ	<p>(<i>Alnus barbata</i>) მურყანი (<i>Populus tremula</i>) ვერხვი (<i>Ulmus filicea</i>) თელა (<i>Fraximus excelsior</i>) კოპიტი (<i>Camellia sinensis</i>) ჩაის მცენარეები (<i>Diospyros kaki</i>) აღმოსავლური ხურმა (<i>Laurus nobilis</i>) დაფნა</p>	<p>(<i>Gleditschia triacanthos</i>) ჩვეულებრივი გლედიჩია (<i>Phaseolus vulgaris</i>) ჩვეულებრივი ლობიო (<i>Pinus</i>) ფიჭვი (<i>Pinus eldarica</i>) (<i>Tuja</i>) ელდარის ფიჭვი (<i>Prunus armenicana</i>) გარგარი (<i>Vitis vinifera</i>) ვაზის ლერწამი</p>
სუსტი მშთანთქმელები	0.001 - 0.1 მგ	<p>(<i>Picea abies</i>) სოჭი (<i>Morus aba</i>) თუთა (<i>Tilia cauxasica</i>) ცაცხვი <i>Phragmites communis</i>) ლერწამი (<i>Zea mays</i>) სიმინდი (<i>Prunus divaricata</i>) ტყე-მალი (<i>Apteryx australis germanica</i>) კივი (<i>Rosa</i>) ვარდი (<i>Platanus</i>) ჭადარი</p>	<p>(<i>Cupressus sempervirens var. Pyramidalis</i>) კვიპსროსი (<i>Pelargonium Reseum</i>) გერანი (<i>Ligustrum vulgare</i>) კვიდო (<i>Ficus carica</i>) ლეღვი (<i>Punica granatum</i>) ბროწეული (<i>Rhododendron ponticum</i>) შქერი (<i>Persica vulgaris</i>) ატმის ხე (<i>Solanum tuberosum</i>) კარტოფილი (<i>Lycopersicon esculentum</i>) პომიდორი (<i>Salix alba</i>) თეთრი ტირიფი (<i>Prunus vachushtii</i>) ქლიავი</p>

ეკოლოგიურ და ბიოლოგიურ უსაფრთხოებასთან ერთად (ნიადაგის სტრუქტურის და მიკროფლორის შენარჩუნება) ეკოლოგიური ფიტოტექნოლოგიების მნიშვნელოვან უპირატესობას წარმოადგენს პროცესის დაბალი ღირებულება ტრადიციულად გამოყენებულ ეკოლოგიურ ტექნოლოგიებთან შედარებით (ცხრილი 7) [91, 133].

ეკოლოგიური ფიტოტექნოლოგიები, რომლებიც მიკრობულ ბიოტექნოლოგიებთან შედარებით დროში ბევრად ხანგრძლივია, საშუალებას იძლევა გაიწმინდოს როგორც ნიადაგი, გრუნტი, წყალსაცავები არადამახასიათებელი ტოქსიკური ბუნების ნაერთებიდან [91, 138].

მეორეს მხრივ, დღეს ფართოდ გამოყენებული ეკოლოგიურ ტექნოლოგიათა უმრავლესობის გამოყენება, მიუხედავად განსაზღვრული ეფექტიანობისა, სრულად არ შეეცდვისება ნიადაგის ხარისხის და ნაყოფიერების მოთხოვნებს. ამ ტექნოლოგიათა უმრავლესობა დამღუპველია ნიადაგის მიკროფლორისთვის.

ცხრილი 7. ინოვაციური და ტრადიციული ფიტორემედიაციული ტექნოლოგიების შედარება

ობიექტი	ფიტორემედიაცია		ტრადიციული ტექნოლოგია		პროგნოზირებული დანაზოგი
	გამოყენების ხერხი	ღირებულება	გამოყენების ხერხი	ღირებულება	
1	2	3	4	5	6
ტყვიით გაბინძურებული ნიადაგი (1 აკრ)	ექსტრაქცია, შეგროვება და მოცილება	\$150,000-250,000	ნიადაგის ამოთხრა და გადატანა	\$500,000	50-65%
გამხსნელებით გაბინძურებული გრუნტის წყლები (2,5 აკრი)	დევრადაცია და ჰიდრავლიკური კონტროლი	\$200,000 დანადგარზე და საწყის მომსახურებაზე	ამოტუმბვა და დამუშავება	\$700,000 ყოველწლიური საექსპლუატაციო ხარჯი	50% დანახარჯის ეკონომია მესამე წლისთვის

ნავთობის ნახშირწყალბადებით გაბინბურებული ნიადაგი (1 აკრი)	<i>in situ</i> დეგრადაცია	\$50,000-100,000	ნიადაგის ამოთხრა და გამოწვა	\$500,000	80%
---	---------------------------	------------------	-----------------------------	-----------	-----

გარემოს ნორმალურ პირობებში მცენარე, ტოქსიკანტის სტრუქტურისა და ნიადაგის მახასიათებლების გათვალისწინებით, მთლიანად ან ნაწილობრივ გააუვნებელყოფს გარემოდან შეთვისებული ტოქსიკურ ნაერთებს.

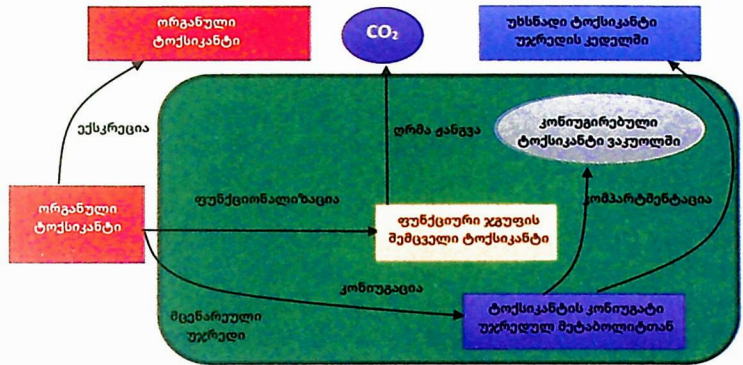
სწორედ მცენარეების ამ თვისებათა ხარჯზე იქნა დამუშავებული ისეთი კონცეფციები, როგორებიცაა „მწვანე ფილტრი“ [133-135] და „მწვანე ღვიძლი“ [140], რაც წარმოადგენს თეორიულ საფუძველს ფიტორემედიაციისათვის - სამრეწველო ეკოლოგიური ტექნოლოგიური მეთოდებისათვის და გამოიყენება უცხო ნივთიერებათა მოსაცილებლად ან გარემოზე მათი ტოქსიკური ეფექტის მნიშვნელოვნად შესამცირებლად. მოკლედ მიმოვიხილოთ მცენარეში მიმდინარე დეტოქსიკაციური პროცესების ბიოქიმიური მექანიზმები.

მცენარეებისთვის უმარტივეს ხერხს, ტოქსიკურ ნაერთთა უარყოფითი მოქმედების თავიდან ასაცილებლად, წარმოადგენს ექსკრეციის პროცესი, რომლის არსი მდგომარეობს იმაში, რომ ტოქსიკანტების მოლეკულები შიგაუჯრედული გარდაქმნების გარეშე გადაადგილდება აპოპლასტის მიმართულებით და მცენარიდან გამოდის. ტოქსიკანტის ელიმინაციის ასეთი გზა, მიუხედავად იმისა, რომ ძალიან მარტივია, მხოლოდ მოძრავი (ფლოემომობილური ან ამბიმობილური) ტოქსიკანტების ძალიან მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაშია შესაძლებელი.

ეკოლოგიური თვალსაზრისით, ექსკრეციის პროცესის დროს ტოქსიკანტი არ განიცდის ქიმიურ გარდაქმნებს, ამიტომ მთლიანად ინარჩუნებს ქიმიურ სტრუქტურას და, შესაბამისად, ტოქსიკურ თვისებებსაც.

როგორც ნახ. 30-ზეა ნაჩვენები, ტოქსიკანტები უჯრედში შეღწევის შემდეგ განიცდის ფერმენტულ გარდაქმნებს, რაც იწვევს

მათი ტოქსიკურობის ხარისხის შემცირებას. თანამედროვე შეხედულებით განიხილავენ მცენარეში ტოქსიკურ ნაერთთა ტრანსფორმაციის სამ თანმიმდევრულ ფაზას:



ნახ. 30. უცხო ნაერთთა გარდაქმნის მექანიზმები მცენარეულ უჯრედში

I ფაზა - ფუნქციონალიზაცია - პროცესი, როდესაც ჰიდროფობური ორგანული ქსენობიოტიკის მოლეკულა ფერმენტულად გარდაიქმნება (დაჟანგვის, აღდგენის, ჰიდროლიზის ან სხვა გზით). ფუნქციონალიზაციის შედეგად ტოქსიკანტის მოლეკულის პოლარობა და რეაქციისუნარიანობა მნიშვნელოვნად იზრდება. რიგ შემთხვევებში, ამას მოჰყვება ტოქსიკანტის ჟანგვითი დეგრადაცია სტანდარტულ უჯრედულ მეტაბოლიტებამდე და, საბოლოოდ, ნახშირორჟანგამდე და წყლამდე. ამ გზით მცენარეული უჯრედი არა მარტო სრულად აუვნებელყოფს უცხო ნაერთს, არამედ მათ ნახშირბადატომებს საკუთარი პლასტიკური და სინთეზური მიზნებისთვის იყენებს. ასეთ გარდაქმნათა ერთობლიობა წარმოადგენს მცენარეული დეტოქსიკაციური პროცესის არსს. თუმცა ქსენობიოტიკების სრული დეტოქსიკაცია მცენარეულ უჯრედში მხოლოდ ტოქსიკანტების დაბალი კონცენტრაციების შემთხვევაში ხორციე-

ლდება. ამას გარკვეული დრო სჭირდება, შესაძლოა დღეებიც კი გაგრძელდეს. საწყის ეტაპზე მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაში ტოქსიკანტის სრული მინერალიზაცია არ ხდება, და შესაძლოა მხოლოდ 20%-ის სრული დაშლა მოხდეს. დარჩენილი ნაწილი შემდგომ ფაზაში - კონიუგაციის პროცესში ერთვება.

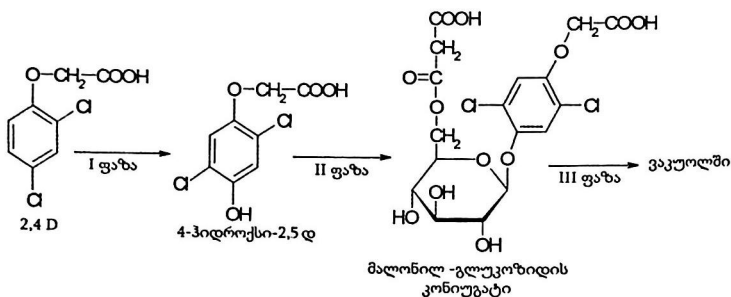
II ფაზა - კონიუგაცია - არის პროცესი, რომლის დროსაც უჯრედში შეღწეული ნივთიერებები და/ან მათი ფუნქციონალიზაციის შედეგად წარმოქმნილი შუალედური ნაერთები უჯრედის ენდოგენურ ნივთიერებებს (ცილები, პეპტიდები, ამინმჟავები, ორგანული მჟავები, ნახშირწყლები, პექტინი, ლიგნინი) ქიმიურად უკავშირდება, რაც პეპტიდური, გლიკოზიდური, ეთერული, ესტერული და სხვა ბუნების ბმების წარმოქმნით ხორციელდება. კონიუგატების წარმოქმნა იწვევს ორგანული ტოქსიკანტის ჰიდროფილობის ზრდას, და, შესაბამისად, მისი ძვრადობის და რეაქციისუნარიანობის მატებას, ყოველივე ამას კი ტოქსიკურობის შემცირებისკენ მივყავართ. ასეთი გარდაქმნები მნიშვნელოვნად აადვილებენ ტოქსიკურ ნაერთთა შემდგომი კომპარტმენტაციის პროცესს.

მიუხედავად იმისა, რომ კონიუგაცია ტოქსიკურ ნივთიერებისგან მცენარეთა თვითდაცვის ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული საშუალებაა, არ შეიძლება იმის მტკიცება, რომ ეს პროცესი მცენარეებისთვის ენერგეტიკულად და ფიზიოლოგიურად ხელსაყრელია. კონიუგაციის დროს ხდება უჯრედისთვის ფუნქციურად მნიშვნელოვანი ნაერთების (უჯრედული მეტაბოლიტების) დახარჯვა, რაც იწვევს უჯრედში მათ გარკვეულ დეფიციტს. ეს აქვეითებს მცენარეთა მდგრადობას სხვა არახელსაყრელი პირობების მიმართ, ე.ი. ასუსტებს მცენარეთა იმუნურ სისტემას. ღრმა დეგრადაციისგან განსხვავებით, კონიუგაცია არ იწვევს ტოქსიკანტის სრულ გაუვნებელყოფას, რადგან ის ინარჩუნებს მოლეკულის ძირითად სტრუქტურას (მაგალითად, არომატულ რგოლს), და მხოლოდ ნაწილობრივ კარგავს ტოქსიკურობას. მონოგრაფიის ავტორთა მონაცემებით, მცენარეების გადატანით ტოქსიკანტებიანი არიდან ისეთ საკვებ არეში, რომელიც არ შეიცავს ტოქსიკურ ნაერთებს, ხდება ტოქსიკანტების ნარჩენების თანდათანობითი

მინერალიზაცია. ეს პროცესი დამახასიათებელია მცენარეთა უმეტესობისთვის, რომლებიც გამოიყენება ეკოლოგიურ ფიტოტექნოლოგიებში. ცხადია კონიუგაცია არ არის ტოქსიკანტების გაუვნებლების ყველაზე კარგი ხერხი ფიზიოლოგიური თვალსაზრისით, მაგრამ დამახასიათებელია მცენარეებისთვის შიგაუჯრედულ ტოქსიკურ ნაერთთა მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაში [139]. მცენარე, რომელიც „შთანთქავს“ ტოქსიკანტებს, ხდება მათი მატარებელი, რადგან ტოქსიკანტების დიდი ნაწილი (ჩვეულებრივ, 50-70% და უფრო მეტიც) მცენარეებში გროვდება კონიუგატების სახით. ეს ფაქტი უდავოდ გათვალისწინებული უნდა იქნას ფიტორემედიაციულ ტექნოლოგიებში მცენარეთა გამოყენებისას. ტოქსიკურ ნივთიერებათა კონიუგატები განსაკუთრებით საშიშია კვების ჯაჭვში მოხვედრისას, რადგან თბილსისხლიან ორგანიზმთა საჭმლის მომნელებელი ტრაქტის ფერმენტებს შეუძლია კონიუგატების დაშლა და, ამგვარად, ტოქსიკანტების გამონთავისუფლება, ამიტომ უადრესად მნიშვნელოვანია, რომ ფიტორემედიაციაში გამოყენებულ მცენარეებს შეძლებისდაგვარად ჰქონდეს მძლავრი ფერმენტული სისტემები (უპირატესად ჟანგვითი), რომლებიც ტოქსიკანტების ღრმა დეგრადაციას ახორციელებს.

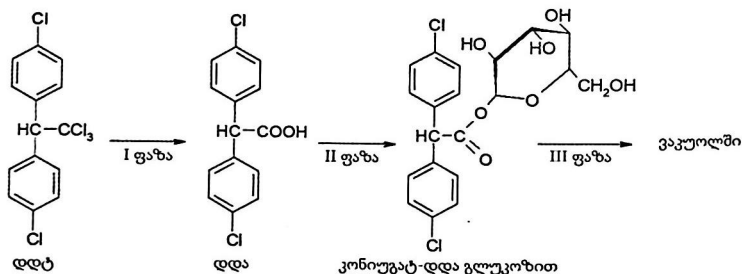
III ფაზა - კომპარტმენტაცია - უმრავლეს შემთხვევაში გარკვეულ უჯრედულ სტრუქტურებში ტოქსიკურ ნაერთთა „დასაწყობებას“ ნიშნავს. ჩვეულებრივ, ხსნადი კონიუგატები ვაკუოლებში აკუმულირდება, ხოლო უხსნადი კონიუგატები, რომლებიც პექტინთან, ლიგნინთან, ჰემიციელოლოზასთან და უჯრედის სხვა პოლიმერებთან დაკავშირებით წარმოიქმნება, უჯრედის კედელში გროვდება.

ტოქსიკურ ნაერთთა ზევით მოტანილი გარდაქმნის სრული პროცესი (ფუნქციონალიზაცია → კონიუგაცია → კომპარტმენტაცია) კარგად ჩანს ქლორორგანული პესტიციდების მაგალითზე. ჰერბიციდი 2,4-დ ჰიდროქსილირების შედეგად წარმოქმნის კონიუგატს გლუკოზასთან და მალონილის ნაშთთან, რის შემდეგაც ხდება მათი ვაკუოლებში გადატანა (ნახ. 31).



ნახ. 31. 2,4-დ-ს ტრანსფორმაცია მცენარეულ უჯრედში

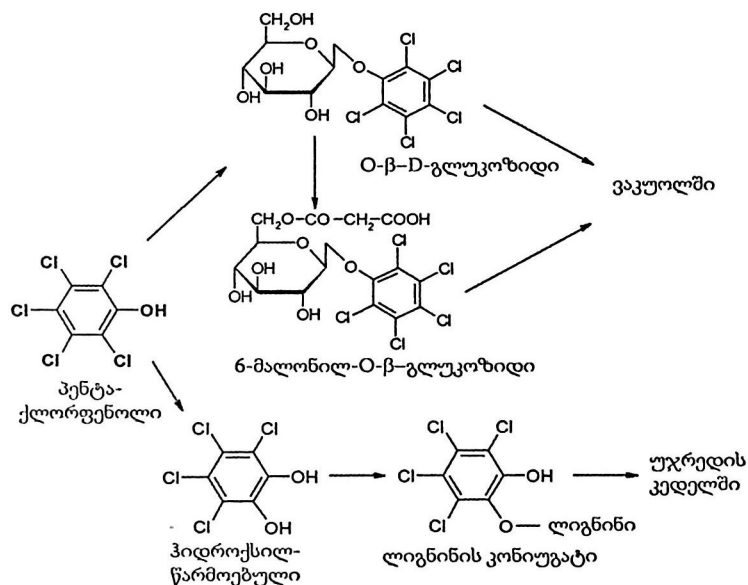
ინსექტიციდი დდტ პირველადი ჟანგვითი რეაქციების შედეგად იძენს კარბოქსილის ჯგუფს, რომელიც ადვილად წარმოქმნის რთულ ეთერს გლუკოზასთან და ვაკუოლებში თავსდება (ნახ. 32).



ნახ. 32. დდტ-ს ტრანსფორმაცია მცენარეულ უჯრედში

ბიოციდი 2,3,4,5,6-პენტაქლოროფენოლი უშუალოდ წარმოქმნის ხსნად კონიუგატებს β -D-გლუკოზიდის და O-მალონილ- β -D-გლუკოზიდის ფორმით, რომლებიც ვაკუოლებში გადაადგილდება. ჰიდროქსილირების შემთხვევაში პენტაქლოროფენოლი იძენს მეორე ჰიდროქსილურ ჯგუფს და ამ შუალედურ პროდუქტს შეუძ-

ლია დაუკავშირდეს ლიგნინს უხსნადი კონიუგატის წარმოქმნით. ამ გარდაქმნის შედეგად ხდება მისი ჩაშენება უჯრედის კედელში (ნახ. 33).



ნახ. 33. 2,3,4,5,6 - პენტაქლორფენოლის ტრანსფორმაცია მცენარეულ უჯრედში

სამივე ფაზაში მიმდინარე ქსენობიოტიკების დეტოქსიკაციის ქიმიური რეაქციები (ფუნქციონალიზაცია, კონიუგაცია და კომპარტმენტაცია) ფერმენტების საშუალებით [129, 133, 135, 136, 138] ხორციელდება. ეს ფერმენტები, ტოქსიკანტების არარსებობისას უჯრედულ ფიზიოლოგიურ პროცესებში მონაწილეობენ.

მცენარეებში ტოქსიკურ ნაერთთა ქიმიური მოდიფიკაციის საწყის რეაქციებში მონაწილეობს შემდეგი ფერმენტები:

- ოქსიდაზები, რომელთა საშუალებითაც ხორციელდება ჰიდროქსილირება, დემეთილირება და სხვა ჟანგვითი

რეაქციები: ციტოქრომ P450-შემცველი მონოოქსიგენაზები, პეროქსიდაზები, ასკორბატოქსიდაზები, კატალაზები და ა.შ.;

- რედუქტაზები, რომელთა საშუალებითაც კატალიზდება ნიტროგუფების აღდგენა (ნიტრორედუქტაზები);
- დეჰალოგენაზები, რომელთა საშუალებითაც ხდება ჰალოგენთა ატომების მოხლეჩა პოლიჰალოგენირებული ტოქსიკური ნაერთებისგან;
- ესტერაზები, რომელთა საშუალებითაც პესტიციდებისა და სხვა ტოქსიკურ ნაერთებში ეთერული ბმების ჰიდროლიზი მიმდინარეობს.

დეტოქსიკაციის მეორე ფაზის პროცესები ეფუძნება ტოქსიკანტებთან დაკავშირების რეაქციებს, რომლებსაც ახორციელებს გლუტათიონ-S-ტრანსფერაზა, გლუკორონოზილ-ტრანსფერაზა და სხვ.

კონიუგატების კომპარტმენტაცია მიმდინარეობს ატმ-შემბოჭველი კასეტური ტრანსპორტირებით. ქსენობიოტიკების სტრუქტურაზე დამოკიდებულით სხვა ფერმენტებსაც შეუძლია მიიღოს მონაწილეობა ტოქსიკურ ნივთიერებათა შიგაუჯრედული დაჟანგვის სხვადასხვა ეტაპებში. მაგალითად, ვაკუოლებში ლოკალიზებული გლუტათიონთან კონიუგატები პეპტიდაზების მოქმედებით ადვილად გარდაიქმნება ცისტეინთან კონიუგატებად. ტოქსიკურ ნივთიერებათა ღრმა ჟანგვის ხანგრძლივ პროცესში ასევე მონაწილეობს პლასტიკური, ენერგეტიკული და აზოტოვანი ცვლის ფერმენტები, რომლებიც მცენარის უჯრედს დამატებითი ენერგიით და ორგანული აზოტით ამარაგებს. მოქმედების ფართო სპექტრის მიუხედავად, მცენარეები არ განსხვავდება უნივერსალური დეტოქსიკაციური უნარით. ასე, მაგალითად, მათ არ შეუძლიათ დიოქსინების, პოლიქლორირებული ბიფენილების და ზოგიერთი სხვა სტაბილური ტოქსიკანტის ასიმილირება. მიუხედავად ამისა, არსებული წარმოდგენებით, მცენარეები წარმოადგენს მოქმედების განსაკუთრებულად ფართო სპექტრის თითქმის უნივერსალური დეტოქსიფიკატორებს.

კარგად არის ცნობილი მიკროორგანიზმების უნარი, განახორციელოს გარემოს რემედიაციული პროცესები ტოქსიკურ ნაერ-

თთა ღრმა დეგრადაციის გზით [29, 139-141]. ეს უნარი ავტორების მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტებითაც იქნა დადასტურებული.

უნდა აღინიშნოს, რომ ტექნოლოგიური მეცნიერებების ფორმირება დაიწყო დაახლოებით 150-200 წლის წინ, როცა დედამიწაზე მოსახლეობის მნიშვნელოვანი რაოდენობა 1-1,5 მილიარდ ადამიანს შეადგენდა პლანეტის სუფთა ეკოლოგიური მდგომარეობის და ბუნებრივი წიაღისეულის დიდი მარაგის პირობებში. რეალურად პლანეტის არსებული ეკოლოგიური მდგომარეობა არ წარმოადგენდა საშიშროებას. დღეს კი ვითარება პრინციპულად შეიცვალა. უკიდურესად რთული ეკოლოგიური სიტუაციის, ბუნებრივი ენერგეტიკული რესურსების თითქმის ამოწურვის, სასმელი წყლის რაოდენობის კატასტროფიული შემცირების, პლანეტის მოსახლეობის არაპროგნოზირებადი ზრდის პირობებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა განახლებად (ენერგეტიკულ და სასურსათო) რესურსებს. ამის გამო შეიცვალა მიდგომა და მოთხოვნები თვით ტექნოლოგიების მიმართ. ეკოლოგიური თვალსაზრისით უადრესად მნიშვნელოვანია დაინერგოს მეცნიერებატევადი, ბუნებისადმი უვნებელი ტექნოლოგიები, რომლებიც არ მოითხოვს არაგანახლებადი ენერგეტიკული რესურსების დიდ დანახარჯს. გენური ინჟინერიის, როგორც სამეცნიერო პრაქტიკული მიმართულების, გამოყენება წარმოადგენს იძულებით ღონისძიებას გარემოს დაცვის მიზნებისთვის, კერძოდ, გარემოს გასაწმენდად ტოქსიკური ნაერთებისგან. უახლესი შეხედულებით საქმე ეხება მცენარეების და მიკროორგანიზმების მაღალაქტიური, ზოგ შემთხვევაში გენმოდიფიცირებული ფორმების გამოყენებას ტექნოგენური ნივთიერებების განსაკუთრებით მაღალი კონცენტრაციებით გაბინძურებულ რეგიონებში, რომელთა რემედიაცია ჩვეულებრივი ეკოტექნოლოგიებით შეუძლებელია.

შეიძლება ითქვას, რომ მძიმე მეტალთა ექსტრაქცია და ტოქსიკურ ორგანულ ნაერთთა დეგრადაცია *in situ* პირობებში ყველაზე იაფი და ბუნებისადმი მეგობრულია. ტექნოლოგია არ ეხება ნიადაგის სტრუქტურას. ლიტერატურაში აღწერილია მცენარე - ტრანსფორმანტებიც, რომლებიც ხასიათდება მაღალი ფიტოექსტრაქციული და ფიტოდეგრადაციული თვისებებით [135].

გენების კლონირებით შექმნილია მთელი რიგი ეკოლოგიური მცენარეების ტრანსფორმანტები, რომლებშიც გაძლიერებულია

ის თვისებები, რომლებიც უცხო ნაერთების შეთვისების, მათი ბიოტრანსფორმაციის, ენდოგენურ ნაერთებთან დაკავშირების, შიგაუჯრედულ სტრუქტურებში (ძირითადად ვაკუოლებში) და უჯრედთა შორის სივრცეში აკუმულირებისა და შემდგომი სრული დეგრადაციისათვის არის საჭირო.

ფიტორემედიაციისთვის პერსპექტიულ მრავალფეროვან მცენარეთა შორის განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს ალვის ხის ოჯახი (*Populus*), რომელიც გამოირჩევა შთანთქმის განსაკუთრებული უნარით, მძლავრი ფესვთა სისტემის გამო. ამ მცენარის მრავალრიცხოვანმა გენეტიკურმა მოდიფიკაციებმა აჩვენა მიღებული ტრანსფორმანტების პრაქტიკული გამოყენების მიზანშეწონილობა.

სხვადასხვა მცენარეში ფერმენტ ციტოქრომ P450-ის გენის კლონირებამ აჩვენა, რომ მცენარეებმა შეიძინა ტოქსიკური ჰერბიციდების მოქმედების მიმართ მაღალი რეზისტენტობა და, ზოგადად, გაზრდილი დეტოქსიკაციური უნარი [135].

გლუტათიონ S-ტრანსგენაზა მცენარეებში ფართოდ გავრცელებული ფერმენტია, რომელიც მონაწილეობს როგორც მცენარეული უჯრედის ნორმალურ მეტაბოლიტურ პროცესებში, ისე სტრესული სიტუაციებისგან მცენარეთა დაცვაში. დიდი ყურადღება ეთმობა ნიადაგიდან ერთ-ერთი ყველაზე გავრცელებული ტოქსიკური ფეთქებადი ნივთიერების ტრინიტროტოლოლის (ტნტ) და მისი შუალედური ტრანსფორმაციის პროდუქტების მოცილებას [142-144]. ფერმენტ ნიტრატრედუქტაზით კლონირებული ტრანსგენური თამბაქო არსებითად განსხვავდება ჩვეულებრივი მცენარისგან როგორც ტოლერანტობით, ისე მნიშვნელოვანი რაოდენობით ტნტ-ს სწრაფი შეთვისების და ასიმილირების უნარით.

მცენარეებში წარმოიქმნება კონიუგატები, რომლებიც შიგაუჯრედული ნაერთების საშუალებით ორგანულ ტოქსიკანტებს ქიმიურად უკავშირდება. მცენარე უნდა ფლობდეს ფერმენტთა მძლავრ მქანგავ სისტემას, რომელიც ტოქსიკანტების ჟანგვით დეგრადაციას მოახდენს და ორგანული ტოქსიკანტებისგან სტანდარტულ უჯრედულ მეტაბოლიტებს წარმოქმნის. ყოველივე ეს ფიტორემედიაციისადმი წაყენებულ ძირითად მოთხოვნას წარმოადგენს.

როგორც ანალიზი გვიჩვენებს, ზოგიერთ მიზანმიმართულად მიღებულ ტრანსგენურ მცენარეებში აღინიშნება დეტოქსიკაციური უნარის მნიშვნელოვანი ზრდა. ზოგიერთი ტრანსგენური მცენარე გამოირჩევა ორგანულ ტოქსიკურ ნაერთთა ასიმილაციის და მძიმე მეტალთა შთანთქმის გაძლიერებული უნარით. ჩვენი აზრით, დეტოქსიკაციური პროცესის, კერძოდ დეტოქსიკაციის პროცესში ბიოქიმიური რთული გარდაქმნების ღრმა და ყოველმხრივი შესწავლა საშუალებას მოგვცემს, შეიქმნას რაციონალური სტრატეგია გენურ-ინჟინერული კვლევების ჩასატარებლად, რასაც მნიშვნელოვანი ეკოლოგიური ხასიათი გააჩნია.

უნდა აღინიშნოს, რომ ბიოლოგიური ეკოლოგიური ტექნოლოგიები, სხვა რემედიაციული ღონისძიებებისგან განსხვავებით, პლანეტის ნებისმიერ რეგიონში, გლობალური მასშტაბით ბუნებისთვის შესაფერისი პირობების რემედიაციის და მონიტორინგის განხორციელების საშუალებას იძლევა.

თავი 4

ახალი გლობალური ეკო-ბიოლოგიური კონცეფცია

რამდენიმე ათეული წლის წინ ტოქსიკური ნივთიერებებისგან გარემოს გაწმენდის გლობალური ალტერნატიული შესაძლებლობის ძიების მიზნით, წინამდებარე მონოგრაფიის ავტორების მონაწილეობით დაწყებული იქნა ბიოლოგიური ეკოტექნოლოგიების, კერძოდ, ბაქტერიების, მიცელიალური სოკოების და აქტინომიცეტების დეტოქსიკაციური პოტენციალის ინტენსიური შესწავლა. ამისთვის გამოიყენებოდა განსხვავებული ქიმიური შედგენილობის მქონე, სხვადასხვა კლიმატურ-ნიადაგობრივი რეგიონებიდან გამოყოფილი შტამები. შედეგად იდენტიფიცირებული იქნა სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების შტამები, რომლებიც სხვადასხვა ქიმიური სტრუქტურის მქონე ნაერთებს ასიმილირებენ. მათ ბაზაზე შეიქმნა ტოქსიკურ ნაერთთა დესტრუქტორი მიკროორგანიზმების კოლექციები [33, 145, 139, 146].

მიკროორგანიზმების დეგრადაციულ პოტენციალზე დაფუძნებულმა ტექნოლოგიებმა უკვე ჰპოვეს პრაქტიკული გამოყენება. ასე მაგალითად, მიკროორგანიზმებს აქტიურად იყენებენ ჩამდინარე წყლების ტექნოგენური ნივთიერებების და ქალაქის სხვა ნარჩენებისგან გაწმენდის საწყის ეტაპებზე. დადგენილია, რომ წყლის გამაბინძურებელი არაბუნებრივი ნაერთების დეგრადაციის მიზნით მიკროორგანიზმების გამოყენება მხოლოდ მნიშვნელოვანი კი არა, მთელ რიგ შემთხვევებში გადაწყვეტიცაა. პარალელურად, მიკროორგანიზმების ეკოლოგიური პოტენციალის შეფასების მიზნით, ჩატარდა კვლევები არადამახასიათებელი ტექნოგენური, ტოქსიკური ნივთიერებებისგან ნიადაგის გაწმენდის მიზნით. უმრავლეს შემთხვევაში მიღებულია შედეგები, რომლებიც ამტკიცებს მიკროორგანიზმების უნარს, განახორციელონ ტოქსიკურ ნივთიერებათა ფართო სპექტრის დეგრადაცია. გარდა ამისა, მნიშვნელოვანია მიკროორგანიზმების ექსტრემოფილური ფორმების არსებობა, რაც შესაძლებელს ხდის მიკროორგანიზმებზე დაფუძნებული რემედი-

აციული ტექნოლოგიების ამოქმედებას პლანეტის თითქმის ნებისმიერ ნიადაგობრივ-კლიმატურ პირობებში.

დიდი რაოდენობის სპეციალური პუბლიკაციების და პატენტების ანალიზმა, რომლებშიც განხილულია მიკრობული ტექნოლოგიებით სხვადასხვა ქიმიური სტრუქტურის მქონე ნივთიერებათა დეგრადაციის უნივერსალური უნარი, გვიჩვენა, რომ მიკროორგანიზმებს წამყვანი როლი ეკუთვნის ნახშირბადის წრებრუნვაში ტოქსიკური ნაერთების ჩართვის პროცესში. იგივე მიკროორგანიზმები ახორციელებენ ეკოლოგიური ნიშების გასუფთავებას ორგანული და არაორგანული ტოქსიკური კომპონენტებისგან [147, 33, 139, 146].

გარდა მნიშვნელოვანი ბიოლოგიური და აგრარული მახასიათებლებისა, ნიადაგის მიკროფლორა, ფლობს რა დეგრადაციულ პოტენციალს, მცენარეთა ფესვთა სისტემასთან ერთად ნიადაგების ბუნებრივი გაწმენდის საფუძველს წარმოადგენს. წინამდებარე თავში, ლიტერატურულ მონაცემებთან ერთად, წარმოდგენილია ავტორთა მიერ ათეული წლების განმავლობაში ჩატარებული კვლევების შედეგები, სადაც ნაჩვენებია, თუ როგორ ახორციელებენ ბაქტერიებისა და მიცელიალური სოკოების სხვადასხვა წარმომადგენლები ტოქსიკურ ნაერთთა დესტრუქციას [148, 149].

კვლევის პროცესში შეიქმნა ბაქტერიების და მიცელიალური სოკოების დაახლოებით 5000 შტამისგან შედგენილი კოლექცია. მასში შემავალი კულტურები გამოყოფილია როგორც ეკოლოგიურად სუფთა, ასევე გაბინძურებული ეკოსისტემებიდან: ნიადაგებიდან, რიზოსფერული გრუნტებიდან, მცენარეული სუბსტრატებიდან, ნავთობის მიტოვებული საბადოების ტერიტორიებიდან, სამხედრო პოლიგონებიდან, ჭაობებიდან, გადამუშავებული წყლების რეზერვუარებიდან და ა.შ. ამავ მიზნით შერჩეულ იქნა სხვა ობიექტებიც ტოქსიკურ ნაერთთა შესაძლო შემცველობით, ისეთები, როგორიცაა, მაგალითად ქიმიური, მეტალურგიული, ნავთობგადამამუშავებელი და სხვა ქარხნების მიმდებარე ნიადაგები.

კოლექციური შტამებისგან შერჩეულია მიკროორგანიზმთა დიდი ჯგუფი (600-მდე შტამი), რომელშიც ექტრემოფილური შტამებია, მათ შორის ჰალოფილები, თერმოფილები, ალკალოფილები,

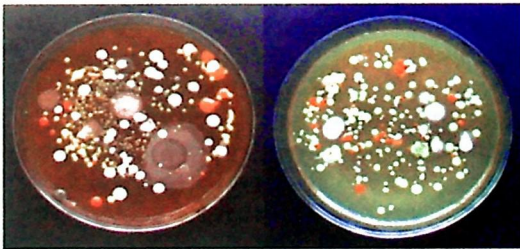
აციდოფილები, ფსიქროფილები. ამ კოლექციის ეკოლოგიური პოტენციალის გამოვლენა და მათი პრაქტიკული გამოყენების შესაძლებლობათა შეფასება, გლობალური, ეკოლოგიური კონცეფციის ერთ-ერთ საფუძველს წარმოადგენს. ძირითადი დასკვნის სახით უნდა აღინიშნოს, რომ მიკროორგანიზმთა მაღალი დეგრადაციული აქტიურობა და ტაქსონომიური მრავალფეროვნება მნიშვნელოვანწილად განსაზღვრავს თავად ნიადაგის დეგრადაციულ პოტენციალს.

ბაქტერიები - წარმოადგენენ ყველაზე გავრცელებულ და მორფოლოგიურად ყველაზე მარტივ დედამიწაზე მოღვაწე ერთუჯრედიან ორგანიზმებს - პროკარიოტებს. აღსანიშნავია, რომ ბაქტერიები არიან ყველა ეკოლოგიურ ნიშის და თითქმის ყველა ცხოველური ორგანიზმის ბინადარნი. მათი ტექნოლოგიური ღირებულება მდგომარეობს საკმაოდ ვრცელ გენეტიკურ ინფორმაციაში, შედარებით მარტივ სტრუქტურულ ორგანიზაციაში და, შესაბამისად, გარემოს პირობებისადმი მარტივ ადაპტაციაში. ბაქტერიების ყოველმხრივი გავრცელების ძირითადი მიზეზია ასევე მაღალი რეპროდუქციული უნარი. უმცირეს დროში (წუთებში) რაოდენობრივად ორმაგდება ბაქტერიების უმრავლესობა, თვით ექსტრემალურ პირობებშიც კი. ზრდისთვის (ბაქტერიული ბიომასის დასაგროვებლად) ეს ორგანიზმები იყენებს ნახშირბადის პრაქტიკულად ყველა ბუნებრივ წაერთს, გარდა ცელულოზისა, ჰემოცელულოზისა და ლიგნინის შემცველ მცენარეული ბიოპოლიმერებისა. ბაქტერიების აერობული ფორმები, როგორც ეს არაერთხელ იქნა ნაჩვენები, ხასიათდება ჰიდროლიზური, ტრანსფორმაციული, სინთეზური ფუნქციების მქონე ფერმენტული სისტემების განსაკუთრებული ფართო ნაკრებით, რაც ტექნოგენურ დაბალმოლეკულურ წაერთთა ფართო სპექტრზე მათი მოქმედების უნივერსალურობას განაპირობებს.

კავკასიის სამხრეთის ფერდობები ცნობილია განსაკუთრებით მდიდარი ბიომრავალფეროვნებით. სწორედ ამ რეგიონის ნიადაგებიდან, 1970 წლიდან დაწყებული, გამოყოფილია ბაქტერიათა შტამები, რომლებიც არსებობის სხვადასხვა პირობებისადმი ადაპტირებული. მათგან შექმნილია მაღალი ეკოლოგიური პოტენციალის მქონე ბაქტერიული შტამების კოლექცია, რომელიც *Bacillus*-ის,

Pseudomonas-ის, *Rhodococcus*-ის, *Mycobacterium*-ისა და *Nocardia*-ს დაახლოებით 3000 წარმომადგენელს მოიცავს (კოლექციის ძირითადი შემქმნელებია პროფესორები ნ. გაგელიძე და ლ. ამირანაშვილი) [141, 150].

კოლექციური ბაქტერიული შტამების, როგორც ეკოლოგიური აგენტების ანალიზი ხორციელდებოდა მათი უნარის მიხედვით, სხვადასხვა სტრუქტურის მქონე ორგანულ ტოქსიკურ ნაერთთა ძირითადი ჩონჩხი ფიზიოლოგიურად უვნებელ მეტაბოლიტებად დაშალონ, ან მათი სრული მინერალიზაცია მოახდინონ. ტოქსიკანტების ტრანსფორმაციის შესაძლო გზების შესწავლის მიზნით რიგ შემთხვევებში გამოყენებული იყო ნიშანდებული ნახშირბადის (^{14}C) შემცველი რადიოაქტიური ნაერთები. მაგალითად, ტოლუოლის დესტრუქტორი ბაქტერიების შტამების სელექციისას (149 კულტურა) კვლევები ძირითადად ტარდებოდა შემდეგი გვარების ბაქტერიათა დომინანტური ნიადაგური ფორმების კულტურებზე: *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Nocardia*, *Mycobacterium*, *Bacillus* (ნახ. 34). შტამების შერჩევა ხდებოდა ტოლუოლის, როგორც ნახშირბადის, ენერჯის და ელექტრონების დონორის გამოყენების უნარით [139, 150].



ნახ. 34. ნიადაგის ტიპური მიკრობიოცა

უნდა აღინიშნოს, რომ საკმაოდ ხშირად ყველა კულტურა, თუნდაც ერთი სახეობის ფარგლებში, როდი ხასიათდება ტოქსიკურ კომპონენტთა დეგრადაციის უნიკალური თვისებებით.

ბაქტერიების საკოლექციო კულტურებიდან გამოყოფილი იქნა აგრეთვე 5 შტამი, რომლებსაც ახასიათებდა ისეთი სტაბილური

ნაერთის დეჰიდრაქციას გამოკვეთილი უნარი, როგორცაა ტნტ-ალსანიშნავი ფაქტია, რომ ეს შტამები ტნტ-ს მიმართ აქტიურობას pH-ის საკმაოდ ფართო დიაპაზონში (4-დან 8-მდე) ავლენდა. ტნტ-ს აქტიური დესტრუქტორ-ბაქტერიების ბიომასის მიღების მიზნით დადგენილი იქნა მათი გამრავლების ოპტიმალური პირობები. გარდა ტნტ-ს მაღალი დამშლელი აქტიურობისა, გამოყოფილ შტამებს აღმოაჩნდათ მინერალური ზეთების, როგორც ნახშირბადის წყაროს, ასიმილაციის უნარიც. ამ მონაცემების საფუძველზე დამუშავებულია ნიადაგების ტნტ-სგან გაწმენდის ტექნოლოგია, რომელიც შემოწმებულ იქნა როგორც ლაბორატორიულ, ისე საველე პირობებში.

ბაქტერიების რემედიაციული პოტენციალის კვლევების პროცესში, გარდა მათი ჩვეულებრივი მეზოფილური ფორმებისა, ბაქტერიების ექსტრემოფილური ფორმების გამოყენების შესაძლებლობაც შეისწავლეს. ეს იმით აიხსნება, რომ ნიადაგების „გაკეთილშობილება“ (გაწმენდა) ტარდება ექსტრემალურ პირობებში, მაგალითად, მარილის მაღალი კონცენტრაციის, ნიადაგების ტუტე ან მჟავა არის, დაბალი ტემპერატურების და ა.შ. ყოველივე ეს მოითხოვს მიკროორგანიზმების ექსტრემოფილური ფორმების გამოყენებას, რომელთაც მეტაბოლიტური გარდაქმნების განხორციელება უჩვეულო პირობებშიც შეუძლიათ [138, 150].

ბაქტერიების უნიკალური უნარი, გაწმინდოს ნიადაგი და წყლის რეზერვუარები ტოქსიკური ნაერთებისგან, ძალიან მნიშვნელოვანია პლანეტის მრავალი რეგიონისთვის, განსაკუთრებით იქ, სადაც ნიადაგი მარილს დიდი რაოდენობით შეიცავს. კავკასიის შედარებით ახალგაზრდა მთის მასივებში, რომლებიც განსაკუთრებული ბიომრავალფეროვნებებით გამოირჩევა, გვხვდება ტბები და წყალსაცავები, რომლებშიც pH-ის მაჩვენებელი მჟავა არეზე მიუთითებს - 2,8-დან 5,0-მდე დიაპაზონში. ასეთ და მსგავს პირობებში მიკროორგანიზმების ჩვეულებრივი მეზოფილური ფორმები იმდენად დაბალი აქტიურობით მოქმედებენ, რომ მიკრობიოლოგიური ეკოტექნოლოგიების გამოყენება აზრს კარგავს. ასეთ პირობებში საჭიროა მიკროორგანიზმების განსაკუთრებული ფორმები, რომლებიც აქტიურად იმოქმედებენ როგორც ზომიერ, ისე ექსტრემოფილურად კრიტიკულ პირობებში. ასეთი შესაძლებლობა არსებობს და კოლექციური კულტურებიდან შესაძლებელი გახდა შესაბამისი ექსტრემოფილური შტამების დადგენა და გამოყოფა.

უნდა აღინიშნოს, რომ რიზოსფერული ბაქტერიების კოლექციაში ბაქტერიების რამდენიმე ასეული ექსტრემოფილური ფორმაა, რომელთა უმრავლესობა დახასიათებულია როგორც ლაბორატორიულ, ისე საველე პირობებში.

ცდების მეორე სერიაში კოლექციური მასალიდან გამოყოფილია ბაქტერიების 39 ალკალოფილური კულტურა, რომელთაც აქვთ საკვები არის ზრდა-განვითარებისთვის ოპტიმალური pH-ის მნიშვნელობები (8,5 - 9,0). საწყის ეტაპებზე ამ კულტურების გამოყენება ტარდებოდა პესტიციდ პენტაქლორფენოლის დეგრადაციის მიზნით, რომელსაც გამოყენების საკმაოდ ფართო არეალი გააჩნია. გამოყოფილია შემდეგი ყველაზე აქტიური ფორმები, რომლებიც იწვევს ამ ტოქსიკანტის დეგრადაციას: *Rhodoocccid sp.*, *Micobacterium sp.*, *Artrobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, რომლებიც ხასიათდება ტუტე არეში ინტენსიური ზრდით და ტოქსიკანტთა დეგრადაციის უნარით.

მიცელიალური სოკოები. ავტორების მიერ, როგორც ბაქტერიების შემთხვევაში, შექმნილია მიცელიალური სოკოების კოლექცია; გამოყოფილია შემდეგი კლასების წარმომადგენელთა 2500 შტამი: ასკომიცეტების (*Ascomycetes*) ზიგომიცეტების (*Zygomycetes*), დეიტერიომიცეტების (*Deiteromycetes*) შემდეგი რიგის წარმომადგენელთა: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor*, *Trichoderma*, *Fusarium*, *Sporotrichum*, *Helmintosporium*, *moctierella*, *Rhizopus*, *Chactomium*, *Gladosporium*. შერჩეულ იქნა 170-ზე მეტი შტამი, რომლებიც სხვადასხვა ქიმიური სტრუქტურის მქონე ორგანული ტოქსიკანტების აქტიურ დესტრუქტორებად გვევლინებიან (ლაბორატორიის ხელმძღვანელი - პროფესორი ლ.ქუთათელაძე) [128, 138, 150].

რადგან ტოქსიკანტების დეგრადაციის უნარი მიკროორგანიზმთა ეკოლოგიურ ღირებულებას განსაზღვრავს, კოლექციური შტამები ცალკეულ ჯგუფებად დაიყო. ასე, მაგალითად, ფეთქებად ნივთიერებათა (ტნტ და ჰექსაჰიდრო-1,3,5-ტრიაზინი) აქტიური დესტრუქტორების 15 შტამიდან შეირჩა სამი ყველაზე აქტიური შტამი, რომლებიც შემოწმებულ იქნა საველე პირობებში და თავიანთი აქტიურობის დონით სავსებით შესაძლებელია რეკომენდებული იყოს პრაქტიკული გამოყენებისთვის. დადგენილია კულტივირების პირობები შემდეგ აქტიურ დესტრუქტორ კულტურათათვის: *Mucor sp.*, TL-1, *Trichoderma sp.*, N2-6, *Aspergillus*

mger N2-6. როგორც ნახშირბადით ნიშანდებული (^{14}C) ნაერთების გამოყენებით ჩატარებულმა ცდებმა აჩვენა, ეს შტამები, რომლებიც 95%-ით და მეტად შლიან ტოქსიკანტს, ნახშირბადატომებს ძირითადად ორგანულ მჟავათა და ამინმჟავათა კონსტრუქციული სინთეზისთვის იყენებენ (ცხრილი 9).

მე-8 ცხრილში ნაჩვენებია სელექციურად შერჩეული შტამების მიერ ტნტ-ს რადიოაქტიური ნიშნის ჩართვა უჯრედულ ნართებში - ორგანულ მჟავებსა და ამინმჟავებში, რაც მიუთითებს, რომ ადგილი აქვს ფეთქებადი ნაერთის ნახშირბადოვანი ჩონჩხის ღრმა დეგრადაციას და ამ დროს გამონთავისუფლებული ნახშირბადატომები უჯრედული მეტაბოლიტების სინთეზში მონაწილეობს.

ცხრილი 8. მიცელიალური სოკოების კულტურების შტამებით ($1-^{14}\text{C}$)-ტნტ-ს ბიოტრანსფორმაციის პროდუქტები

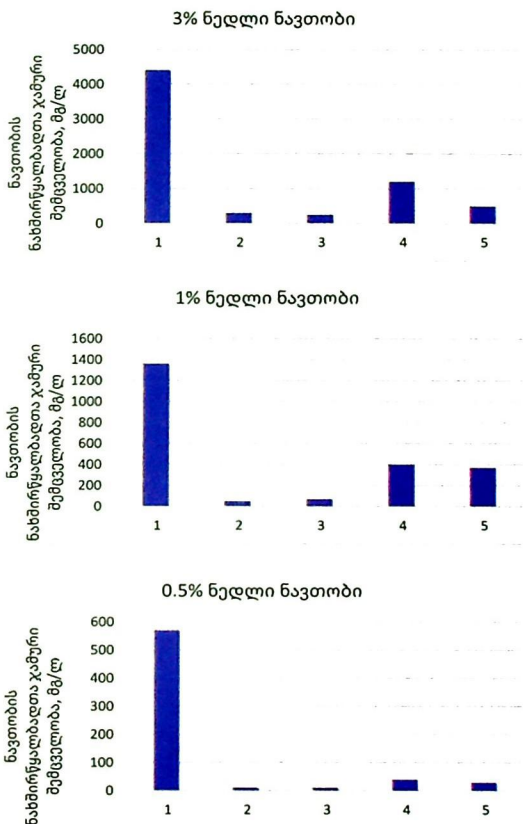
შტამის დასახელება	მეტაბოლიტების რადიოაქტიურობა ტრინიტროტოლუოლის საერთო საწყისი რადიოაქტიურობიდან, %	
	ორგანული მჟავები	ამინმჟავები
<i>Mucor</i> sp., TI-1	70,20	25,60
<i>Trichoderma</i> sp., N 2-6	74,40	21,60
<i>Aspergillus niger</i>	92,80	5,10

ცდების სპეციალურ სერიაში შესწავლილ იქნა მიკროსკოპული სოკოების შერჩეული შტამების კონსორციუმის გამოყენების შესაძლებლობა ზღვის ზედაპირზე დაღვრილი და შავმიწა ნიადაგებში მოხვედრილი ნავთობის ნახშირწყალბადების უტილიზაციის მიზნით (ნახ. 35-37).

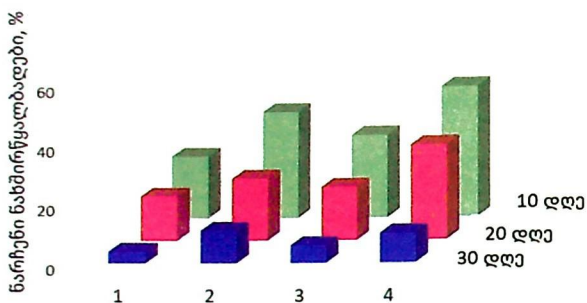
დადგენილ იქნა, რომ ნედლი ნავთობის 1-3% კონცენტრაციის შემთხვევაში მიკრობული კონსორციუმით ნავთობის კომპონენტთა შეთვისებამ 5 დღე-ღამის განმავლობაში 90% შეადგინა.

ექსპერიმენტულად დადგინდა, რომ მიკროორგანიზმების კონსორციუმების სწორად შერჩევისას შესაძლებელია რამდენჯერმე გაიზარდოს მიკრობიოლოგიური კონსორციუმის დეტოქსიკაციური

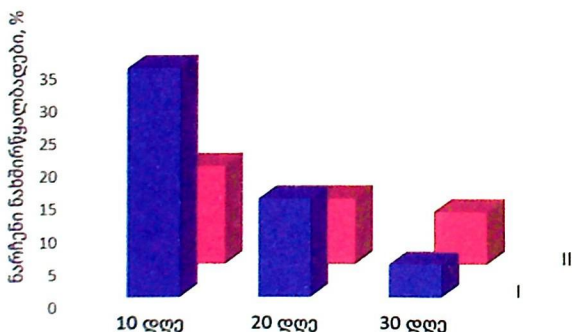
პოტენციალი როგორც ერთ ტექსონომიურ ჯგუფის ფარგლებში, ისე, განსაკუთრებით, მიცელიალური სოკოების, ბაქტერიების და აქტინომიციტების ცალკეული შტამების ერთობლივი გამოყენებისას.



ნახ. 35. ნავთობის ნახშირწყალბადების დეგრადაცია ჰალოფილური შტამების მიერ. 1 – კონტროლი (ზღვის წყალი + ნავთობი); 2 – *Trichoderma viride* + ზღვის წყალი + ნავთობი; 3 – *Aspergillus niger* + ზღვის წყალი + ნავთობი; 4 – *Rhodococcus* sp. + ზღვის წყალი + ნავთობი; 5 – *Pseudomonas* sp. + ზღვის წყალი + ნავთობი.



ნახ. 36. ნედლი ნავთობის კომპონენტების ასიმილაცია ჰალოფილური შტამის *Chaetomium* sp. J2-2 მიერ შავმიწა და წითელმიწა ნიადაგებზე (ნავთობის საწყისი კონცენტრაცია - 1%). 1 - შავმიწა ნიადაგი + ნავთობი + *Chaetomium* sp. J2-2; 2 - წითელმიწა ნიადაგი + ნავთობი + *Chaetomium* sp. J2-2; 3 - შავმიწა ნიადაგი + ნავთობი + *Trichoderma viride* J 3-1; 4 - წითელმიწა ნიადაგი + ნავთობი + *Trichoderma viride* J 3-1



ნახ. 37. ჰალოფილური კულტურის *Chaetomium* sp. J2-2 მიერ შავმიწა და წითელმიწა ნიადაგებში ნედლი ნავთობის კომპონენტების შეთვისება. I - შავმიწა ნიადაგი; II - წითელმიწა ნიადაგი.

დიდ ინტერესს იწვევს სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების კონსორციუმები, რომელთა რემედიაციული პოტენციალიც მიკროორგანიზმების ერთობლივ მოქმედებას ეფუძნება. განსაკუთრებული სიახლით გამოირჩევა მცენარეების და მიკროორგანიზმების ერთობლივი დეგრადაციული პოტენციალი. უმრავლეს შემთხვევაში ეს პროცესი სიმბიოზურ ხასიათს ატარებს, ე.ი. ხდება ტოქსიკანტის დეგრადაციის რაოდენობრივი ზრდა, რაც კომპონენტების მოქმედებათა არითმეტიკულ ჯამს აღემატება. სინთეზურ ორგანულ ნაერთთა დიდი ნაირსახეობა, რომელთა ემისიას ახორციელებს მრეწველობა, ტრანსპორტი, სოფლის მეურნეობა, ტიპურ გამაბინძურებლებს წარმოადგენს და განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს [151]. ნიადაგში ამ ნივთიერებათა მომატებული რაოდენობა წარმოადგენს სერიოზულ საშიშროებას ადამიანის ჯანმრთელობისთვის, სიმსივნური წარმონაქმნების ჩათვლით. ამ მხრივ, საინტერესოა არაპათოგენური ენდოფიტური და ფესვთა სისტემის ახლოს მობინადრე ბაქტერიები. ეს ორგანიზმები გამოირჩევიან პესტიციდების და მათი ნაწილობრივი გარდაქმნის პროდუქტების ეფექტიანად დეგრადირების უნარით და, ამგვარად, ნიადაგის ფენის ტოქსიკურობას ამცირებენ [152].

ტოქსიკურ გამონაბოლქვების გავრცელება მთელი პლანეტის მასშტაბით ყველა ქვეყნის და კონტინენტისთვის უნივერსალური ხასიათისაა, თუმცა მის უკონტროლო გავრცელებას განსაკუთრებული საშიშროება განვითარებად ქვეყნებში მოაქვს. ეს გამონაბოლქვები ყველა ცოცხალ ორგანიზმზე მავნედ ზემოქმედებენ. ნაშრომში მოყვანილია მონაცემები, რომლებიც მოწმობენ მიკროორგანიზმების მიერ ქიმიური სინთეზით მიღებული ტოქსიკური პესტიციდების ამომწურავი დეგრადაციის უნარზე [153].

ანტარქტიკის ნიადაგიდან გამოყოფილია შტამი, *Penicillium* sp. CHY-2, რომელიც შეიცავს 5.8SrRNA გენს (სეკვენირების მონაცემებით). დადგენილია შტამის მიერ ტოქსიკანტების ფართო ბიოდეგრადაციული უნარი 13 სხვადასხვა ტოქსიკური ნაერთის მიმართ, მათ შორისაა 4-ბუტილფენოლის იზომერები, 4-ოქტილფენოლი, 4-ქლორფენოლი, ფენოლი, ბისფენოლი A (4,4'-(პროპან-2,2-დილი) დიფენოლი), ბენზოლი, ტოლუოლი, ქსილოლი, ნაფტალინი და ფენანთრენი. აღსანიშნავია, რომ შტამი მაღალ აქტივობას დაბალი ტემპერატურის (4°C) პირობებშიც ავლენს, ხოლო დეტერგენტის

- ტვინ 80-ის დამატებით მისი დეგრადაციული პოტენციალი იზრდება [154].

ლიტერატურაში აღწერილია მიცელიალური სოკოებითა და ბაქტერიების მიერ ორგანული გამაბინძურებლების ბიოდეგრადაციის პროცესის მექანიზმები [155, 156]. ბიოდეგრადაციის ეფექტიანობა განისაზღვრება ორი ურთიერთდაკავშირებული პროცესით: ზრდით და მეტაბოლიზმით. მიკროორგანიზმების ზრდისა და განვითარებისთვის საჭირო ენერჯისა და ნახშირბადის წყაროს უზრუნველყოფა ხდება ორგანულ ტოქსიკანტთა დეგრადაციის ხარჯზე. კომეტაბოლიზმი განისაზღვრება, როგორც ორგანულ ნაერთთა მეტაბოლიზმი, რომლებშიც ნახშირბადის და ენერჯის წყაროს დაშლილი ტოქსიკანტის ნახშირბადატომები წარმოადგენს. ხაზი უნდა გაესვას იმასაც, რომ ზოგიერთი მიკროორგანიზმი ფლობს გენეტიკურად დეტერმინებულ უნარს, შეითვისოს და გარდაქმნას გამაბინძურებლების დიდი რაოდენობა.

შთამბეჭდავია ახალი მონაცემები, რომლებიც ეხება დიოქსინების ბიოდეგრადაციას, ნივთიერებებისა, რომლებიც მათი განსაკუთრებული სტაბილურობის გამო, დიდი ხნის განმავლობაში არადეგრადირებად ნივთიერებად ითვლებოდა [157].

ზემოდ მოყვანილი მონაცემების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ მიცელიალურ სოკოებს და ბაქტერიებს, ცალ-ცალკე და ერთად, შეუძლიათ ჟანგვითი დეგრადაციის გზით განახორციელონ სხვადასხვა სტრუქტურის ტოქსიკურ ნაერთთა ფართო სპექტრის დეგრადაცია. მიკროორგანიზმების დეტოქსიკაციური უნარის ანალიზის პროცესში განმსაზღვრელ ფაქტორს წარმოადგენს ტოქსიკანტის დესტრუქციის ნიშნის გამოვლენა მიკროორგანიზმების რომელიმე კონკრეტული კულტურის მიერ. ამით დგინდება ამ შტამის გენომში შესაბამისი გენების არსებობა, რომლებიც პასუხისმგებელია კონკრეტული ტოქსიკანტის გარდაქმნაზე. დეგრადაციის უნარის შემდგომი გაძლიერება შესაძლებელია შტამის ფიზიოლოგიის შესწავლით, რაც დაკავშირებულია ამ უნარის გაძლიერებასთან ფიზიოლოგიური მეთოდებით ან გენების დუბლირებით. ასეთი მეთოდოლოგია მიკროორგანიზმების აქტიური შტამების შექმნის საშუალებას იძლევა ეკოლოგიურ ტექნოლოგიებში მათი ფართო გამოყენების მიზნით.

ქვემოთ მოცემულია ტოქსიკურ ნაერთთა სია, რომლებიც განსხვავებული ინტენსივობით იშლება მიკროორგანიზმების სხვადასხვა ტაქსონომიურ ჯგუფის წარმომადგენლის მიერ.

ბუნებრივი და ანთროპოგენური ნაერთები, რომელთა შეთვისება ხდება სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფის მიკროორგანიზმების მიერ.

ნახშირწყალბადები:

- ალკანები, ციკლოალკანები, ალკენები და ალკინები (მეთანი, ეთანი, პროპანი, ბუტანი, პენტანი, ჰექსანი, ეთილენი, აცეტილენი, ციკლოჰექსანი)
- არენები (ბენზოლი, ტოლუოლი, ეთილბენზოლი, ქსილანები)
- პოლიციკლური არომატული ნახშირწყალბადები (ნაფტალინი, 1,2-ბენზ(a) ანთრაცენი, 3,4-ბენზპირენი, დიბენზ(a,h) ანთრაცენი, 3-მეთილქოლანტრენი)

ფუნქციურ ჯგუფიანი ნაერთები:

- სპირტები (მეთანოლი, ეთანოლი, იზოპროპანოლი, ბუტანოლი, პენტანოლი, ჰექსანოლი, ოქტანოლი, ბენზილის სპირტი)
- ფენოლები (ფენოლი, კრეზოლი, α -ნაფთოლი, ფლუოროფენოლი)
- ალდეჰიდები და კეტონები (ფორმალდეჰიდი, აცეტალდეჰიდი, აცეტონი)
- ნიტროწარმოებულები (ფეთქებადი ნაერთები) (ნიტრობენზოლი, დინიტრობენზოლები, 2,4-დინიტროფენოლი, 1,3,5-ტრინიტროტოლუოლი, ნიტროფენოლები, ჰექსაჰიდრო-1,3,5-ტრინიტრო-1,3,5-ტრიაზინი, ოქტაჰიდრო-1,3,5,7-ტეტრანიტრო-1,3,5,7-ტეტრაზოცინი და სხვ.)
- ამინები (ანილინი, დიმეთილანილინები, ბენზიდინი და სხვ.)

პესტიციდები - ნივთიერებები, რომლებიც მიეკუთვნება სხვადასხვა ქიმიურ კლასს: კარბამატები, თიოკარბამატები, დიპირიდოლები, ტრიაზინები, ფენოქსიაცეტატები, კუმარინები, ნიტრო-

ფენოლები, პირაზოლები, პირეტროიდები და ქლორის, ფოსფორის, კალის, ვერცხლისწყლის, დარიშხნის, სპილენძის და სხვა ელემენტთა შემცველი ორგანული ნაერთები, მაგალითად:

- ქლორორგანული პესტიციდები: დდტ, 2,4-დ, 2,4,5-ტ, ქლორდანი, დიელდრინი, ლინდანი და სხვ.
- ფოსფორორგანული პესტიციდები: კარბოფოსი, პარათიონი, დიქლოფოსი, და სხვ.
- ტრიაზინები: ტრიაზინი, ატრაზინი, სიმაზინი და სხვ.
- კარბამატები და თიოკარბამატები: 1-ნაფტილმეთილკარბამატი, მანგანუმეთილენ-1,2-ბისთიოკარბამატი, მანები, ცინები და სხვ.
- ქლორორგანული გამსხნელები: ქლორჩანაცვლებული ალკანები (ქლოროფორმი, დიქლორეთანი, ტრიქლორეთანი, ეთილენქლორჰიდრინი და სხვ.
- ქლორჩანაცვლებული პოლიმერები: პოლივინილქლორიდი, პოლივინილ ქლორიდი და სხვ.
- დიოქსინები: პოლიქლორირებული დიბენზდიოქსინები და დიბენზფურანები.
- პოლიქლორირებული ბიფენილები: 2,21,3,31,4 - პენტაქლორბიფენილი (აროკლორ -1254), 3,3,5 ტრიქლორბიფენოლი (აროკლორ - 1016) და სხვ.
- პერფტორირებული ნაერთები: პერფტოროქტანსულფონის მჟავა, პოლიტეტრაფტორეთილენი და სხვ.
- მძიმე მეტალები: ტყვიის, ვერცხლისწყლის, კადმიუმის, სპილენძის, ქრომის, მანგანუმის, ურანის და ა.შ. შემცველი ნივთიერებები, დარიშხანის ნაერთები.
- არაორგანული აირები: ოზონი, აზოტის ოქსიდები, გოგირდის ოქსიდები, ნახშირბადის მონოქსიდი, ამიაკი და ა.შ.

ეს სია არ არის ამომწურავი და იგი მომავალში განახლდება.

4.1. მცენარეები და მიკროორგანიზმები

თუ გავითვალისწინებთ, რომ ნიადაგში რიზოსფერულ მიკროორგანიზმების და მცენარეთა ფესვთა სისტემის კოოპერირებული მოქმედება ნაყოფიერების ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს პირობას წარმოადგენს, შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ნიადაგის ეკოლოგიური სისუფთავეც ასევე მნიშვნელოვანწილად უნდა განისაზღვრებოდეს დეტოქსიკაციურ პროცესებში მათი ერთობლივი თანამონაწილეობით.

ავტორების მიერ ექსპერიმენტულად მრავალგზის იქნა დადგენილი, რომ მიკროორგანიზმების და მცენარეების ერთობლივი მონაწილეობა დეტოქსიკაციურ პროცესებში, რომლებიც ნიადაგში ხორციელდება, არა მარტო შესაძლებელია, არამედ მნიშვნელოვნად სასურველიცაა. შავმიწა და წითელმიწა ნიადაგების პირობებში შეიმჩნევა განსაზღვრული სინერგიზმი მიკროორგანიზმების და მცენარეების ერთობლივ მოქმედებაში, რაც მნიშვნელოვნად აღემატება თითოეულის ცალკე აღებულ ინდივიდუალურ შესაძლებლობას. დეტოქსიკაციის პროცესში მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების ფერმენტთა სიმძლავრეების მიხანმიმართული გაერთიანება ბევრად აფართოებს ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიების შესაძლებლობებს. ყოველივე ზემოთქმულის საფუძველზე მცენარეები, მიკროორგანიზმებთან ერთად, შეიძლება განვიხილოთ, როგორც მნიშვნელოვანი ეკოლოგიური აგენტები, რომლებიც ფართო სპექტრით მონაწილეობენ დეტოქსიკაციურ პროცესებში. სინერგიზმი მიკროორგანიზმების და მცენარეების ერთობლივი მოქმედებისას რიგი ფაქტორებით განისაზღვრება: პირველი, მნიშვნელოვნად დიდი რაოდენობის ფერმენტები მონაწილეობს რემედიაციულ პროცესებში; მეორე, მიკროორგანიზმებისთვის და მცენარეებისთვის დამახასიათებელი, ტოქსიკანტების დეგრადაციის განსხვავებული მეტაბოლიტური გზები საშუალებას იძლევა განხორციელდეს ფართო სპექტრის ნივთიერებათა სრულად ამომწურავი გარდაქმნა. პროცესის მნიშვნელოვან ფაქტორს წარმოადგენს ამ ორგანიზმთა კოორდინირებული თანამონაწილეობა ტოქსიკანტების დეგრადაციაში. მაგალითად, მცენარეთა ფესვთა სისტემა გამოყოფს ექსუდატებს, რომლებიც ნიადაგის მიკროორგანიზმთა აქტიური გამრავლებას უწყობს ხელს და, შესაბამისად, ამ უკანას-

კნელთ რემედიაციული პოტენციალის გამოვლინებაში ეხმარება. დეტოქსიკაციური პროცესის მნიშვნელოვან ეტაპს წარმოადგენს ნიადაგში ტოქსიკურ ნივთიერებათა პირველადი გარდაქმნა მიკროორგანიზმების ფერმენტების (მუანგავი, აღმდგენი, ჰიდროლიზური) მოქმედებით, რითაც ხდება მცენარეებით მათი შეთვისებისა და გარდაქმნის გაადვილება. ყველა ეს პროცესი ჩვეულებრივ პირობებში სპონტანურად ნიადაგის მიკროფლორის (ბაქტერიები, მიცელიალური სოკოები და აქტინომიცეტები) ფერმენტების და ერთობლივი მოქმედებით ხორციელდება. უნდა აღინიშნოს, რომ მიკროორგანიზმების და მცენარეების სელექციურად შერჩეული სახეობები მრავალჯერ აძლიერებენ პროცესის ეფექტიანობას. ასეთი რემედიაციულ ღონისძიებათა განხორციელება არ იწვევს ნიადაგის სტრუქტურის ნაწილობრივ დეგრადაციასაც კი. პირიქით, ხელს უწყობს ნიადაგის უფრო ძლიერი მიკრობული ასოციაციის შექმნას, რომელსაც უნარი შესწევს, ნიადაგის რეგულარული პროცესების გარდა, პერმანენტულად გაწმინდოს ნიადაგი ტოქსიკური და სხვა უცხო ნივთიერებებისგან.

ნიადაგის დეტოქსიკაციური პროცესების მრავალჯერადად გასაძლიერებლად, აუცილებელია მცენარეების და მიკროორგანიზმების წინასწარი სელექციის ჩატარება, რომელთა შერჩევა სპეციალური კრიტერიუმებით ხდება. ასეთ კრიტერიუმებს წარმოადგენს: მიკროორგანიზმების სწრაფი ზრდის უნარი, მცენარეთა კარგად განვითარებული, ღრმა და ფართო ფესვთა სისტემა; ტოქსიკანტის დეგრადაციაში მონაწილე ფერმენტული სრული ნაკრების არსებობა; ნიადაგობრივ-კლიმატური და სხვა პირობებისადმი სწრაფი ადაპტაციის უნარი; მთელი რიგი ექსტრემალური ფაქტორების (მარილის კონცენტრაცია, მჟავიანობა, ტემპერატურა და სხვ.) მიმართ ტოლერანტობა და სხვ. ძირითადი ბიოტექნოლოგიური აგენტების შერჩევის გარდა, აუცილებელია მცენარეებისთვის ისეთი აგროტექნოლოგიური პირობების შექმნა, რომელიც ნიადაგის ბუნებრივი დეგრადაციული პოტენციალს მნიშვნელოვნად გაზრდის.

საინტერესოა, როგორ წარმოიქმნება ფერმენტები, რომელთა საშუალებით ხდება დეტოქსიკაციური გარდაქმნები? მათი ნაწილი სინთეზირდება ინდუქციის პროცესის შედეგად, უჯრედში ტოქსიკურ ნაერთთა შეღწევის საპასუხოდ, ხოლო მეორე ნაწილი, ე.წ. კო-

ნსტიტუციური ფერმენტები, უჯრედში არსებულია და ისინი რეგულარულ მეტაბოლიტურ პროცესებს წარმართავენ (ცხრილი 9).

ცხრილი 9. დეტოქსიკაციურ პროცესებში მონაწილე მცენარეთა ძირითადი ჟანგვითი მეტალფერმენტები

ფერმენტი	ფიზიოლოგიური ფუნქცია	შემცველობა უჯრედში	ლოკალიზაცია	ტოქსიკანტებისადმი სპეციფიკურობა	მალიმიტირებული უჯრედული ნივთიერებები	სტაბილურობა
ციტოქრომ P450,	მონაწილეობა მეტაბოლიტების ბიოსინთეზის რეაქციებში	მცირე რაოდენობით, ინდუცირებული სინთეზი	ენდოპლაზმური რეტიკულუმი, ციტოზოლი	არაპოლარული ტოქსიკანტებისადმი ძალიან წრაფვა	NADPH, NADH	ლაბილური, სუბსტრატის და ჟანგვით ხდება ინაქტივაცია
პეროქსიდაზა	ჰორმონული რეგულაცია, ლიგნიფიკაცია, საპასუხო რეაქცია სტრესზე, პეროქსიდების მოცილება	დიდი რაოდენობით ინდუცირებული სინთეზი	უჯრედის კედელი, ვაკუოლები, ტონოპლასტები, პლასტიდები, პლაზმალემა	სწრაფვა ალიფატიური ნაერთებისადმი	წყალბადის პეროქსიდი ან ორგანული ჰიდროპეროქსიდები	სტაბილური
ფენოლოქსიდაზა	ფენოლების ჟანგვითი რეაქციები, ლიგნიფიკაცია, უჯრედის დამცველი რეაქციები	დიდი რაოდენობით, არსებობის კონსტიტუციური ფორმა	ქლოროპლასტები, უჯრედის კედელი, ციტოზოლი, ტონოპლასტები	სწრაფვა არომატიული ნაერთებისადმი	ენდოგენური ფენოლები	სტაბილური

მოცემული მონოგრაფიის ავტორთა კვლევებით ერთმნიშვნელოვნად იქნა დადგენილი მიკროორგანიზმთა, განსაკუთრებით ბაქტერიების და მიცელიალური სოკოების უნარი, განახორციელონ ქიმიურად გაბინძურებულ ნიადაგსა და წყალში ორგანულ ტოქსიკურ კომპონენტთა ფართო სპექტრის დეტოქსიკაცია [138, 139, 150].

მცენარეების და სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების მიკროორგანიზმების (ბაქტერიები, მიცელიალური სოკოები) ერთობლივი მოქმედებით იქმნება ახალი ინოვაციური ბიოლოგიური გლობალური კონცეფციის საფუძველი, პლანეტის ხმელეთის დიდი ტერიტორიების ეკოლოგიური ბალანსის და ეკოლოგიური უსაფრთხოების უზრუნველსაყოფად.

ჩატარებულ იქნა ფართო სელექცია მიკროორგანიზმების (ბაქტერიები, აქტინობაქტერიები, მიცელიალური სოკოები, საფუვრები) ყველა ტაქსონომიურ ჯგუფში, აქტიური დეტოქსიფიკატორებით ტოქსიკურ ნაერთთა დეგრადაციის უნარის გამოვლენის მიზნით [146, 139, 128].

ბაქტერიების 800-ზე მეტი შტამისთვის ჩატარდა გამოკვლევები სხვადასხვა ქიმიური კლასის ტოქსიკურ ნაერთთა ნაწილობრივი ან სრული დაშლის უნარის გამოსავლენად. ამასთან კვლევებში გამოყენებულ იქნა *Pseudomonas* და *Bacillus*-ის 400-ზე მეტი კოლექციური შტამი და *Mycobacterium* და *Rhodococcus*-ის 300-ზე მეტი სელექციურად შერჩეული შტამი. ჩატარებული სკრინინგით გამოვლინდა შტამები, რომლებიც აქტიურად ახდენენ სხვადასხვა სტრუქტურის ტოქსიკურ ნაერთთა ტრანსფორმაციას და/ან სრულ დეგრადაციას.

მიკრობიოლოგიურ კოლექციაში დადგენილია აქტიური შტამების (90 კულტურაზე მეტი) არსებობა, რომლებიც აქტიურად ითვისებენ ნავთობის ნახშირწყალბადებს, პესტიციდებს, ქლორირებულ ნახშირწყალბადებს, ფეთქებად ნივთიერებებს. ექსპერიმენტულად იქნა დადგენილი, რომ ნიადაგში მოხვედრილი უცხო ნაერთი თავდაპირველად განიცდის მიკრობულ (ფერმენტულ) ტრანსფორმაციას, ყველაზე ხშირად, ჟანგვით დეგრადაციას ან ჰიდროლიზს [126, 138, 146].

ეს პირველადი გარდაქმნები იწვევს ტოქსიკანტის ტრანსფორმირებას უფრო ხელსაყრელ (ჰიდროფილურ) ნაერთად, ნიადაგში ან თვით მცენარეში შემდგომი ტრანსფორმაციისთვის. ნიადაგის მიკროფლორას, მთელ რიგ შემთხვევებში, ნიადაგში დამოუკიდებლად (მცენარის გარეშე) შეუძლია განახორციელოს უცხო ნივთიერებათა მრავალსაფეხურიანი გარდაქმნა მინერალიზაციის ჩათვლით. მაგრამ ხშირად ტოქსიკურ ნაერთთა ყველაზე სრული მინერალიზაცია ხდება მიკროორგანიზმების და მცენარეების ერთდროული მონაწილეობით. ასეთი კოლაბორაცია ნიადაგის დეტოქსიკაციურ პროცესებში, წარმოადგენს სინერგიზმის უნიკალურ ბიოლოგიურ ეფექტს. შემუშავებული ბიოტექნოლოგიის ყველა ეტაპზე გათვალისწინებული უნდა იქნას, რომ ჩვეულებრივი ქიმიური რეაქციებისგან განსხვავებით, ბიოლოგიური გარდაქმნები უფრო ნელი ტემპით ხორციელდება და არ მოქმედებს ნიადაგის სტრუქტურაზე. სრულად გარდაქმნისთვის აუცილებელია ნიადაგის შესაბამისი მჟავიანობა, ნალექების საჭირო რაოდენობა, სათანადო აგროტექნიკური ღონისძიებები.

რადიოაქტიური ნახშირბადით (^{14}C) ნიშანდებული ნაერთების გამოყენებით ჩატარებული კვლევებით დადგინდა, რომ ამ ნაერთთა დეგრადაციის სიჩქარით მიკროორგანიზმები მნიშვნელოვნად აღემატებიან მცენარეებს. ქვემოთ მოგვყვავს ამ ბიოტექნოლოგიის პრაქტიკულ გამოყენებასთან დაკავშირებული ზოგიერთი ძირითადი პირობა. საწყისი მონაცემების სახით აუცილებელია განვიხილოთ ნიადაგის შემდეგი მახასიათებლები:

- ნიადაგის ტიპი, ორგანული და არაორგანული ნაწილის რაოდენობრივი მახასიათებლები;
- ნიადაგში არსებული მიკროფლორის ბუნებრივი შედგენილობა;
- ნიადაგის ეკოლოგიური მდგომარეობა, შესაძლო ეროზია, ქიმიური კომპონენტებით გაბინძურება, გაბინძურების ტიპი, ნალექების რაოდენობა და მათი პერიოდულობა;
- ტემპერატურული რეჟიმი (საშუალო წლიური ტემპერატურა, მაქსიმალური ტემპერატურა წლის თბილ პერიოდში და მისი ხანგრძლივობა, მინიმალური ტემპერატურა წლის ცივ პერიოდში და მისი ხანგრძლივობა);

- ნიადაგის ექსპლუატაციის ფორმა განვლილ 3 წელიწადში;
- კულტივირებულ მცენარეთა სახეობები განვლილ 3 წელიწადში.

გაბინძურებული რეგიონის ნიადაგობრივი და კლიმატური მახასიათებლიდან გამომდინარე, ხორციელდება საჭირო შტამის ან კონსორციუმის (მეზოფილური, თერმოფილური, ჰალოფილური და სხვ.) შერჩევა.

მოცემული ბიოტექნოლოგიის პრაქტიკული რეალიზაცია სრული მოცულობით შესაძლებელია მხოლოდ ადგილობრივ პირობებთან უკეთ ადაპტირებულ მიკროორგანიზმთა დომინანტური ფორმების ბაზაზე. ტექნოლოგიის პრაქტიკული რეალიზაცია მოითხოვს ზოგიერთ დამატებით საწყის მონაცემებს, რომლებიც დაკავშირებულია ნიადაგთან, რეგიონის კლიმატთან, 100 კილომეტრის რადიუსში ტექნოგენური ნივთიერებების (ქიმიური, მეტალურგიული, ნავთობგადამამუშავებელი და სხვა საწარმოებისგან გამოფრქვეული) პოტენციური წყაროები. ყველა ამ მონაცემის არსებობა საშუალებას იძლევა, სრული მასშტაბით შემუშავდეს ბიოტექნოლოგია, რომელშიც ძირითად ბიოტექნოლოგიურ-ეკოლოგიურ აგენტებს მცენარეები და მიკრობული კონსორციუმები წარმოადგენს [151,152].

შტამების არსებობა მიკროორგანიზმების კოლექციის სახით და, შესაბამისად, მათ ბაზაზე აქტიური დეტოქსიფიკატორების სელექცია, განსაკუთრებულად მნიშვნელოვანი ფაქტორია და მოცემული ბიოტექნოლოგიის ეფექტიანობის განმსაზღვრელია [85, 131, 146].

ქვემოთ მოცემულია მიკროორგანიზმების საბაზო ეკოლოგიური კოლექციის (შექმნილია ავტორების მიერ) მოკლე დახასიათება. კოლექცია მოიცავს ბაქტერიების, მიცელიალური სოკოებისა და აქტინომიცეტების 5000-ზე მეტ შტამს, რომლებიც გამოყოფილია კავკასიის, ასევე ევროპის და შუა აზიის სხვა რეგიონების ყველა ზონის ნიადაგებიდან და მცენარეული სუბსტრატებიდან. ჩატარებული მრავალრიცხოვანი კვლევების შედეგად გამოვლენილი და დახასიათებულია ბაქტერიების და სოკოების შტამები, რომლებიც აქტიურად ახორციელებენ ეკოლოგიურ გამაბინძურებელთა ფართო სპექტრის დეგრადაციას.

შერჩეულ შტამებში დადგენილია მიკროორგანიზმების როგორც ზომიერი, ისე ექსტრემული ფორმების არსებობა, როგორც ბიცა მათთვის ოპტიმალურ პირობებში აქტიურად მოქმედი თერმოფილები, ჰალოფილები, ალკალიფილები, ფსიქროფილები, აციდოფილები. მეზოფილური და ექსტრემოფილური კულტურების კოლექციების არსებობა და მათ საფუძველზე შექმნილი კონსორციუმების გამოყენება სხვადასხვაგვარ კლიმატურ პირობებში ნიადაგების გასუფთავების შესაძლებლობას იძლევა. ასე, მაგალითად, გაბინძურების სახეობაზე დამოკიდებულებით განსაკუთრებულ ინტერესს წარმოადგენს სელექციურად შერჩეული მიკრობიოლოგიური შტამების უშუალო გამოყენება ნიადაგების, გრუნტების, წყლის რესურსების და სხვა ბიოლოგიური ობიექტების ტოქსიკური ნაერთებისგან გასაწმენდად, მიკრობიოლოგიური დეგრადაციით (მინერალიზაციით). გარდა ამისა, ნიადაგიდან გამოყოფილი მიკროორგანიზმების გამოყენება, მცენარეთა ფესვთა სისტემაში (რიზოსფეროში) შეტანით მნიშვნელოვნად ასუფთავებს ნიადაგს ტოქსიკური კომპონენტებისგან.

ნიადაგების გაწმენდის და მცენარეების და მიკროორგანიზმების გამოყენება განსაკუთრებით ეფექტიანია თბილ და ზომიერ კლიმატურ პირობებში, როდესაც ზაფხულში საშუალო სადღეღამისო ტემპერატურა დაახლოებით 25°C (დასაშვებია ხანმოკლე გადახრები 10°C -მდე) [127, 128].

ამ დონის ტემპერატურის რეგიონები წარმოადგენს ოპტიმალურს მეზოფილური და თერმოფილური ორგანიზმებისთვის. ასეთ პირობებში მოქმედება მაქსიმალურად ეფექტიანია. რა თქმა უნდა, ეს არ ნიშნავს, რომ მოცემული ბიოტექნოლოგია გამოუსადეგარია უფრო ცივი რეგიონებისთვის, სადაც, მიუხედავად დაბალი, მაგრამ ტექნოლოგიის ფარგლებში დასაშვები ტემპერატურისა ($+5^{\circ}\text{C}$ -მდე), ფსიქროფილური შტამების გამოყენების საშუალებას იძლევა [127, 128].

ტუტე ნიადაგებში, ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით, შესაძლებელია ნიადაგში მობინადრე და კოლექციაში არსებული ჰალოალკალოფილების, თერმოალკალოფილების და მეზოალკალოფილების შტამების გამოყენება. რამდენიმე ასეული კოლექციური ჰალოფილური კულტურა, რომლებიც უპირატესობას

ანიჭებენ მლაშე ნიადაგებს, მათი პრაქტიკული გამოყენების კარგ საფუძველს წარმოადგენენ დამლაშებული ნიადაგებისთვის, რომლებიც ტექნოგენური ნაერთებითაა დაბინძურებული.

მიკროორგანიზმებისა და მცენარეების დეტოქსიკაციური პოტენციალის მიზანმიმართულ ერთობლივ გამოყენებაზე დაფუძნებული ბიოტექნოლოგიის გამოყენება შესაძლებელი გახდა მხოლოდ მცენარეთა დეტოქსიკაციური თავისებურებების გამოვლენის შემდეგ. ბუნებაში ნიადაგის მიკროორგანიზმები და მცენარეები ახორციელებენ ყველა ეკოლოგიური ნიშის გაწმენდას, რაც უზრუნველყოფს ნორმალური პირობების შექმნას ყველა ცოცხალი ორგანიზმისთვის. შესაბამისად, გარემოსთვის დამახასიათებელი ბუნებრივი დეტოქსიკაციური მექანიზმი მოქმედებს დამოუკიდებლად და მუდმივად. ისმის კითხვა: რაში მდგომარეობს წარმოდგენილი ტექნოლოგიის თავისებურება და რაშია მისი ორიგინალობა?

როგორც მრავალწლიანი პრაქტიკა გვიჩვენებს, ნიადაგში, რომელიც ტოქსიკური ნაერთების დაგროვების ძირითად ადგილს წარმოადგენს, შესამჩნევ დეტოქსიკაციურ პოტენციალს მიკროფლორის მხოლოდ 5% ამჟღავნებს. ნიადაგის მიკროორგანიზმების დარჩენილი ნაწილი მონაწილეობს მნიშვნელოვან ფიზიოლოგიურ და ბიოქიმიურ პროცესებში (ჰიდროლიზი, სინთეზი, ტრანსფორმაცია, ჟანგვითი პროცესები და ნიადაგის ნაერთების სხვა მნიშვნელოვანი გარდაქმნები). ავტორების მიერ შემუშავებული ბიოტექნოლოგიის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს ნიადაგის მიკროფლორის დეტოქსიკაციური უნარის მნიშვნელოვანი გაზრდა, ნიადაგში აქტიური ბაქტერიების და მიცელიალური სოკოების წინასწარ შერჩეული შტამების შეტანით.

ნიადაგის მიკროფლორის დეგრადაციული პოტენციალის გაზრდა აქტიური შტამების შეტანით, რაც ნიადაგის სტრუქტურის დაუზიანებლად ხდება, მნიშვნელოვნად აძლიერებს მის ჯამურ რემედიაციულ უნარს და ამასთან ერთად მთელ ფუნქციურ დატვირთვასაც ინარჩუნებს.

ნიადაგის მიკროფლორისა და სპეციალურად შერჩეული მცენარეების ერთობლივი გამოყენება ინოვაციური ეკოლოგიური

ტექნოლოგიის საფუძველია, რასაც გლობალური ხასიათი აქვს. ფაქტობრივად, დამუშავებული ბიოტექნოლოგიის არსი წარმოადგენს აქტიური მიკროორგანიზმების შტამების და მცენარეების სელექციაზე დაფუძნებულ ტექნოლოგიას, რომელიც ახორციელებს ტოქსიკური კომპონენტების დეგრადაციას ნიადაგში და წყალსაცავებში [158].

მხედველობაში თუ მივიღებთ მიკროორგანიზმების (ბაქტერიები, აქტინომიცეტები და მიცელიალური სოკოები) სწრაფ და მაღალ დეგრადაციულ უნარს მაღალი ტექნოგენური გაბინძურების პირობებში, ტექნოლოგიურად მიზანშეწონილია, რომ ტოქსიკურ ნაერთებზე პირველადი მოქმედება სწორედ მიკროორგანიზმებით განხორციელდეს. ეს დააჩქარებს დეგრადაციის საწყის (და არა მხოლოდ საწყის) სტადიებს, რაც მიკროორგანიზმებით ბევრად უფრო სწრაფად ხორციელდება, ვიდრე მცენარეებით. ეს ეტაპი ნაწილობრივ დეგრადირებულ, ჰიდროფილურ შუალედურ პროდუქტებს მეტაბოლიტური გარდაქმნებისთვის მოამზადებს და როგორც მცენარის ფესვთა სისტემაში, ისე მიწისზედა ორგანოებში ტრანსპირაციული ნაკადით მათ გადატანას გააადვილებს.

პლანეტის მთელ რიგ რეგიონებში ნიადაგის ტოქსიკური ნაერთების ბუნებრივად განხორციელებულ დეტოქსიკაციის პროცესს აღარ შესწევს უნარი, მოახდინოს ანთროპოგენური გამაბინძურებლების სულ უფრო მზარდი რაოდენობის ტრანსფორმირება უვნებელ ნივთიერებად. ამის შედეგად, ასეთ რეგიონებში მიმდინარეობს გამაბინძურებელთა კონცენტრაციის მუდმივი ზრდა ყველა ეკოლოგიურ ნიშაში. ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიების გავრცელებას, რომლებიც დაფუძნებულია მიკროორგანიზმების და მცენარეების მოქმედებაზე, შეუძლია არსებითად შეცვალოს გარემოს ეკოლოგიური მდგრადობა, ცოცხალ ბუნებაზე ექსტრემული პირობების გამოყენების გარეშე.

წარმოდგენილი ბიოტექნოლოგია ითვალისწინებს სელექციური კვლევების ჩატარებას სხვადასხვა ნიადაგობრივ-კლიმატურ ზონებში, ადგილობრივი პირობებისადმი კარგად ადაპტირებული მცენარეებისა და მიკროორგანიზმების სახეობათა შერჩევის მიზნით. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად იქნას

გამოყენებული როგორც მიკროორგანიზმების, ისე მცენარეების რემედიაციული პოტენციალი.

სხვადასხვა ნიადაგებიდან მიზანმიმართულად შერჩეული მიკროორგანიზმების მაღალაქტიური ფორმები და მცენარეთა ლოკალური პირობებისადმი ასევე კარგად ადაპტირებული ადგილობრივი სახეობები წარმოადგენს იმ ბუნებრივ პოტენციალს, რომელიც მუდმივად ახორციელებს ნიადაგში მოხვედრილ ქიმიურ ნაერთთა ტოქსიკური და არაბუნებრივი ფორმების კონვერსიას. სწორედ ასეთი მიდგომა იძლევა ნიადაგის და წყალსატევების ეკოლოგიური პოტენციალის მრავალჯერ გაზრდის საშუალებას, რაც მოცემული ეკოლოგიური კონცეფციის საფუძველს წარმოადგენს. ტექნიკური სიმარტივის, მცირე ეკონომიკური ხარჯის, ეკოლოგიური უსაფრთხოების, უცხო ქიმიურ ნაერთთა ფართო სპექტრის გაუვნებელყოფის უნარის გამო, მოწოდებული ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგია სადღეისოდ მთელი პლანეტის მომცველ რეალურ შესაძლებლობას წარმოადგენს.

ტექნოლოგიური უზრუნველყოფისთვის აუცილებელია აქტიური დეგრადაციული უნარის მქონე მიკროორგანიზმების შტამების სელექციაზე სპეციალური მიკრობიოლოგიური ლაბორატორიების და მცენარეთა ფიზიოლოგიის სპეციალისტთა ჯგუფების არსებობა. წინასწარი მონაცემებით, მომსახურე პერსონალი უნდა შედგებოდეს ინჟინრებისგან, ქიმიკოსებისგან, ბიოლოგებისგან და აგარარიკოსებისგან. საერთაშორისო მასშტაბით ბიოტექნოლოგიის რეალიზაციის შემთხვევაში, აუცილებელია გეოგრაფების, ეკონომისტების, სოციოლოგების და სახელმწიფო სტრუქტურების წარმომადგენელთა მონაწილეობა.

მონოგრაფიაში, თანამედროვე ლიტერატურულ მონაცემებთან ერთად, მოცემულია ავტორთა თითქმის უკანასკნელი სამი ათეული წლის კვლევების შედეგები. პირველად არის შექმნილი სხვადასხვა ტაქსონომიური ჯგუფების მიკროორგანიზმთა კოლექციები, დაფუძნებული მათ დეტოქსიკაციურ თვისებებზე. მიკროორგანიზმების და მცენარეების საფუძველზე დამუშავებულია გლობალური, ინოვაციური ბიოტექნოლოგიები, რომელთა რეალიზაცია აუცილებელია გარემოს მონიტორინგის და ეკოლო-

გიური ბალანსის შესანარჩუნებლად. არსებული რეალობიდან გამომდინარე, აუცილებელია მაღალი დონის საერთაშორისო ორგანიზაციის შექმნა, რომელიც პლანეტის გლობალურ ეკოლოგიურ სტრატეგიას განსაზღვრავს.

ეჭვს არ იწვევს, რომ ავტორთა მიერ შემუშავებული უნიკალური ეკოლოგიური ბიოტექნოლოგიები მოწოდებულია განახორციელოს ტოქსიკანტების ბიოლოგიური დეგრადაცია ან ტრანსფორმაცია გარემოსთვის უვნებელ კომპონენტებად. იშვიათ შემთხვევებში ტექნოლოგიის გამოყენება შესაძლებელია კანცეროგენური, მაღალი მდგრადობის მქონე კომპონენტებით განსაკუთრებით მაღალი დონით გაბინძურებულ რეგიონებში, მათი სრული გაუვნებელყოფის მიზნით. განსაკუთრებულ შემთხვევებში მიზანშეწონილია, როგორც ბიოლოგიური, ისე ფიზიკური და ქიმიური ეკოლოგიური ტექნოლოგიების ერთობლივი გამოყენება [139, 150].

დასკვნა

XXI საუკუნემ სხვა ბევრ პრობლემებთან ერთად სამი ძირითადი ამოცანის წინაშე დააყენა საზოგადოება, ესენია: სურსათი, ენერგეტიკა და ეკოლოგია. სწორედ ამ მიმართულებით სწარმოებს მეცნიერების, ინჟინრებისა და პრაქტიკოსების ძირითადი ძალისხმევა. მიუხედავად მთელი რიგი ახალი, აბსოლუტურად ინოვაციური წინადადებებისა და ტექნოლოგიებისა, ვითარება არა თუ მსუბუქდება არამედ უფრო რთული და კრიტიკული ხდება. აღნიშნული პრობლემები ხშირად პოლიტიკაშიც გადადის და ქვეყნების ურთიერთდაპირისპირების საგნად არის ქცეული.

გეოპოლიტიკური სტაბილურობა წარმოადგენს საზოგადოების უმნიშვნელოვანეს ფაქტორს, რომელიც თანამედროვე პირობებში პლანეტაზე მოსახლე განსხვავებული კონფესიების ეროვნებების თანაარსებობას განსაზღვრავს. არანაკლებ მნიშვნელოვანია ყველა ქვეყანასთან შეთანხმებული, ერთიანი, სასიცოცხლოდ აუცილებელი ბუნების დაცვის კონცეფციის შექმნა [158, 159].

დღეს საზოგადოების შემფოთებას, რაც გარემოს პრობლემებითაა გამოწვეული, სერიოზული საფუძველი გააჩნია. XXI საუკუნისთვის დამახასიათებელი უმწვავესი ეკოლოგიური პრობლემები უკვე იხატება სხვადასხვა არასასურველ გეო-ბიო-ეკოლოგიურ მოვლენებსა და ფაქტებში. ეს არის არატრადიციული ინფექციური დაავადებანი, მათ შორის, ვირუსული, არადამახასიათებელი კლიმატური ცვლილებები, როგორცაა, მაგალითად, გლობალური დათბობა და მასთან დაკავშირებული ყინულების დიდი მასივების დნობა, ადამიანთა და ცხოველთა შორის ანომალიების მნიშვნელოვანი ზრდა და სხვ. ეს უკვე არსებული ცვლილებების მხოლოდ მცირერიცხოვანი ჩამონათვალია, რაც მჭიდროდ უკავშირდება გარემოში ტოქსიკურობის და რადიაციის ზრდას, პლანეტის ბიომრავალფეროვნების შემცირებას. ცხადია, გარემოს ნებისმიერი უმნიშვნელო ცვლილებებიც კი მოქმედებს ადამიანის ფიზიოლოგიაზე, მის გენომზეც, რაც სპონტანურ მუტაციებს, ნორმალური ფიზიოლოგიური და ბიოქიმიური პროცესებიდან გადახრებს იწვევს. იმის წინასწარ ვარაუდი, თუ როგორი იქნება მომავალში ამ გადახრების სიხშირე და მასშტაბები, შეუძლებელია, თუმცა, სრულიად ნათე-

ლია, რომ მათი უმრავლესობა, შესაძლოა, ადამიანებისთვის ფატალური აღმოჩნდეს. *Homo sapiens*-ისთვის ტოქსიკური ნაერთებით გამოწვეული მოდიფიკაციები საშიში და უკიდურესად არასასურველი მოვლენაა. ამასთანავე პლანეტის მოსახლეობის ყოველწლიური ზრდის ტემპები, რომელიც არა ნაკლებ 1%-ს შეადგენს (100 მილიონზე მეტს წელიწადში), უკვე კარგა ხანია კაცობრიობისათვის სერიოზულ პრობლემად იქცა, რაც ართულებს ისედაც უკიდურეს ზღვრამდე მისულ საარსებო გარემო პირობებს.

ჩვენს პლანეტაზე სიცოცხლის არსებობა ორი ძირითადი პრობლემის წინაშე დგას: პირველი, მოსახლეობის რა რაოდენობას შეუძლია არსებობა პლანეტაზე, რომელთაც ექნებათ ცხოვრების თუნდაც მინიმალური პირობები? და მეორე, რამდენად სრულფასოვნად არის გამოყენებული პლანეტის პოტენციალი, რომელიც უზრუნველყოფს მოსახლეობის არსებობას საკვებით, ენერჯით და შესაბამისი ეკოლოგიით? ცხადია, საზოგადოების განვითარების თანამედროვე ეტაპზე კაცობრიობის წინაშე სხვა ძალიან მნიშვნელოვანი პრობლემებიცაა, მაგალითად, სუსტად დაცული ბიომრავალფეროვნება, რომელიც კაცობრიობის არსებობის ლაკმუსის ქაღალდია და რომელიც უკვე მნიშვნელოვნად არის შემცირებული. სამწუხაროდ ეს პროცესი XXI საუკუნეშიც ინტენსიურად გრძელდება. ბუნებაში სიცოცხლის ყველა ფორმა უხილავი კავშირებით არის ურთიერთდაკავშირებული და ნებისმიერი მათგანის გაქრობა მოქმედებს სხვების კეთილდღეობაზე. გარემოს დაცვა - ბუნებასა და ადამიანს შორის ჰარმონიის დამყარებაში გამოიხატება. რაც უფრო ღრმად ვწვდებით ბუნების ჭეშმარიტებას, მით უფრო მეტი საოცარი ურთიერთდამოკიდებულება ვლინდება. ცხადია, ყოველივე ეს ეკოლოგიის თვალთახედვით მეტად მნიშვნელოვანია, რაც შესანიშნავად გამოხატა დიდმა ვაჟამ:

„ხევი მთას ჰმონებს, მთა - ხევსა,
წყალნი - ტყეს, ტყენი - მდინარეთ,
ყვავილნი მიწას და მიწა -
თავის აღზრდილთა მცენარეთ,
და მე ხომ ყველას მონა ვარ,
პირზე ოფლ-გადამდინარედ!“

ეკოლოგიური პრობლემების მრავალფეროვნებით ცილდება ერთი ნებისმიერი დარგის ჩარჩოებს. მათი გადაჭრა მხოლოდ სხვადასხვა მეცნიერების ერთობლივი, დარგის მაღალკვალიფიცირებულ სპეციალისტთა მონაწილეობითაა შესაძლებელი. ეკოლოგია, რომელიც გარემოს დაცვასა და აღდგენას ემსახურება, სწორედ ის ფოკუსია, სადაც უნდა ხდებოდეს საბუნებისმეტყველო, ტექნიკურ და ჰუმანიტარულ მეცნიერებათა მჭიდრო თანამშრომლობა.

ადამიანი ბუნების ნაწილია და როგორც არ უნდა მოიხმაროს იგი საკუთარი მიზნებისთვის, მაინც იძულებულია თავისი ყოფამის კანონებს შეუსაბამოს. არა ბუნების დაპყრობა, არამედ ბუნებისა და საზოგადოების ერთობლივი ჰარმონიული განვითარება წარმოადგენს სიცოცხლის ერთადერთ საარსებო გზას [154]. სხვაგვარად კაცობრიობას გადარჩენა არ უწერია, დღეს უკვე ვიცით, რომ მივალწიეთ გარემოს სისუფთავის კრიტიკულ ზღვარს, რომლის გადალახვა უკუშეუქცევად ცვლილებებს გამოიწვევს.

გარემოს გაბინძურების პრობლემის გადასაჭრელად ბევრი ღონისძიებაა გატარებული, მათ შორის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესია არაგანახლებადი ტრადიციული ენერჯის წყაროების შეცვლა ან მნიშვნელოვანი შემცირება განახლებადი ბუნებრივი წყაროებით: ჰიდროელექტროსადგურებით, გეოთერმული წყლებით, მზის და ქარის ენერჯით. მაგალითად ატომური ელექტროსადგურები, ტრადიციულ წყაროებთან შედარებით გაცილებით მეტ ელექტროენერჯიას გამოიმუშავებს, არ ბინძურდება გარემო გამონაბოლქვით, მაგრამ მათი მოხმარება მოითხოვს დიდ ყურადღებას. 1 კილოგრამი ლოურენსიუმი ცვლის ნავთობისა და გაზის მთელ წლიურ მარაგს, რაც 30 მილიარდ ბარელ ნავთობს შეადგენს.

სწრაფად მზარდი საზოგადოებისთვის საკვების მასშტაბური წარმოება და გათბობა მოითხოვს ენერჯის სოლიდურ რაოდენობას. ამ მიზნით აუცილებელია ახალი, ბუნებასთან მეგობრული ტიპის ტექნოლოგიების შექმნა. ეს გამოწვეულია მოსახლეობის სწრაფი ზრდით და აგრარული პლანტაციების მასიური შემცირებით. ასე მაგალითად, უკვე პოპულარული ახალი ტექნოლოგიური მიმართულება ითვალისწინებს „მოძრაობას ზევით“, ე.ი. ვე-

რტიკალური მზარდი მცენარეების ორგანიზაციას, კულტივირებული ფართობების სპეციალურად ამ მიზნით ორგანიზებულ სათბურებში.

მცენარე, როგორც მუდმივად მოქმედი ენერგეტიკული წყარო, რომელსაც უშუალო კონტაქტი გააჩნია ნიადაგთან, ზომიერ და უფრო მეტად თბილ კლიმატის მქონე რეგიონებში, წარმოქმნის 8-10 მილიარდ კილოკალორიას წელიწადში ჰექტარზე. ამ ენერჯის გამოყენება ყველაზე ეფექტურად მოსავლის მიღებით და მცენარეული ბიომასის დაგროვებით შეიძლება. ბუნებაში განახლებადი სითბოს რესურსები საკმარისად არსებობს, აუცილებელია მათი მიზანმიმართული გამოყენება.

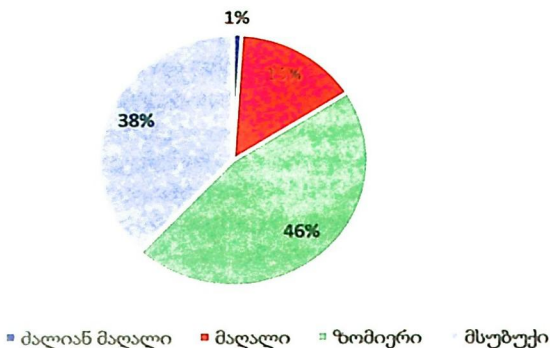
წყლის გაწმენდა და გამტკნარება, სასმელად ვარგის კონდიციონებში გადასაცვანად, თანამედროვეობის ერთ-ერთ უმთავრეს სასურსათო და ეკოლოგიურ პრობლემას წარმოადგენს. ამ მიზნით უკანასკნელ პერიოდში დამუშავებულია არა ერთი ინოვაციური საინჟინრო პროექტი. მაგალითად, სტენფორდის უნივერსიტეტში (აშშ) შეიმუშავეს დანადგარი, რომელიც მზით აქტიურდება და 20 წუთში ანადგურებს წყალში არსებულ ბაქტერიას 99,999%-ს, რაც მედიცინისა და სხვა დარგებისათვის მნიშვნელოვან სტერილური წყლის მიღების საშუალებას იძლევა.

ამავე მიზნით შექმნილია ხელსაწყო, რომელიც აუმჯობესებს ჰაერისა და ობიექტების ზედაპირების დეზინფექციის ეფექტიანობას და გამოირჩევა განსაკუთრებით ძლიერი ვირუსების, კერძოდ, კოვიდ-19-ის საწინააღმდეგო მოქმედების უნარით. ამ ხელსაწყოთა საშუალებით ხორციელდება დახურულ სივრცეებში ჰაერისა და ობიექტის ზედაპირების დეზინფექცია. აღწერილი პროცესის დახმარებით ძალიან სწრაფად და ეფექტურად ხდება დაავადებების გამწვევი ვირუსის განადგურება [155].

გაეროს საკვების და სოფლის მეურნეობის ორგანიზაციის (FAO) მონაცემებით, 2050 წლისთვის მოთხოვნილება საკვებზე 60%-ით გაიზრდება, ხოლო განვითარებად ქვეყნებში თითქმის 100%-ით. ამ მოთხოვნილების დაკმაყოფილებას სერიოზული პრობლემა აწერხებს, კერძოდ, ოფიციალური მონაცემებით ნიადაგის მსოფლიო მარაგის 33% თითქმის დეგრადირებულია, ეროზიის, ორგანული რესურსების გამოფიტვის, დამლაშების, წყლის

უკმარისობის, ტოქსიკური ნივთიერებებით და გაბინძურების გამო. პლანეტის მასშტაბით არარაციონალური გამოყენების გამო უკვე დაკარგულია 2 მილიარდ ჰექტარამდე პროდუქტიული ნიადაგის რესურსი, უფრო მეტი, ვიდრე დღეს არსებული სახნავი ფართობია. ნიადაგების დეგრადაციის ერთ-ერთ ძირითად ფაქტორს ტოქსიკურ ნაერთთა მუდმივად მზარდი რაოდენობა და მიწის რესურსების გამოყენების არარაციონალური, მთლიანად ქიმიკატებზე დამყარებული ტექნოლოგიები წარმოადგენს. ბუნებრივი ფაქტორებიდან, რომლებიც ნიადაგის დეგრადაციას იწვევს, პირველ რიგში, უნდა აღინიშნოს ხშირად არსებული წყლით გამოწვეული ეროზია, რაც იწვევს ნიადაგის საფარის დაშლას. დიდ ზიანს აყენებს ნიადაგს ქარით გამოწვეული ეროზიაც, განსაკუთრებით, სტეპებში, დამახასიათებელ მტვრიან, ხშირი ქარიშხლების მქონე რეგიონებში. ამ ფაქტორების მოქმედებით, ეროზიის გარდა, შეინიშნება დარჩენილი ნიადაგის ორგანული ნაერთებით და განსაკუთრებით ბმული აზოტშემცველი ნაერთებით გაღარიბება, რაც არსებითად აქვეითებს ნიადაგის იმუნურ სისტემას.

FAO-ს რეკომენდაციით, ნიადაგის, როგორც ხანგრძლივ-მოქმედი და არაგანახლებადი რესურსის სრული აღდგენისთვის, ღრმა ეროზიის შემთხვევაში, თითქმის ერთი თაობის შესაბამისი დროა საჭირო. უახლოესი ტექნოლოგიების დახმარებით ეროზირებული ნიადაგების აღდგენა შეიძლება მოხდეს ბევრად მოკლე დროში თანამედროვე აგრობიოორგანული ტექნოლოგიების გამოყენებით: ჰუმუსის წარმოქმნის დაჩქარებით და სელექციურად შერჩეული ნიადაგის მიკრობული კონსორციუმების (ბაქტერიები, მიცელიალური სოკოები, აქტინომიცეტები) ნიადაგში შეტანით (რეგიონის ნიადაგობრივ-კლიმატური პირობების გათვალისწინებით). ათწლეულის განმავლობაში ჩატარებული კვლევების საფუძველზე დამუშავებულია ახალი ბიოლოგიური კონცეფცია, რომელიც მუდმივმოქმედ ეკოლოგიურ ტექნოლოგიას წარმოადგენს. ამ ტექნოლოგიის გამოყენებით შესაძლებელია ეროზირებული ნიადაგის გაცილებით მოკლე დროში აღდგენა, მონიტორინგის ჩატარება და ეკოლოგიური დისბალანსის გამოსწორება (ნახ. 38).

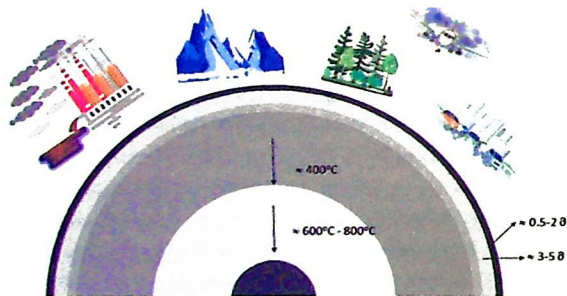


ნახ. 38. დედამიწის მთლიანი ნიადაგის დეგრადაციის ხარისხი.

მონოგრაფიაში წარმოდგენილი კონცეფცია წარმოადგენს ბუნებრივ ბიოლოგიურ პროცესს, დაფუძნებულს მიკროორგანიზმების და მცენარეების ერთობლივ სინერგიულ უნარზე, მოახდინოს ტოქსიკურ ბუნებრივ და ანთროპოგენურ წარმოშობის ნაერთთა დეგრადაცია და/ან გარდაქმნა ბუნებისთვის დამახასიათებელ არატოქსიკურ კომპონენტებად. ტექნოლოგიის ეფექტიანობის არსებითი გაზრდა მიიღწევა როგორც მცენარეების, ისე მიკროორგანიზმების აქტიური ფორმებით (რომლებიც სავსე პირობებში აქტიურად ახდენენ ქიმიური გამაბინძურებლების ასიმილირებას). ავტორთა გათვლებით, ბუნებრივად არსებული მიკროორგანიზმების და მცენარეების დეტოქსიკაციური პოტენციალის ერთობლივი მოქმედების ეფექტიანობა არ აღემატება მათი მაქსიმალური პოტენციალის 5%-ს. ეს იმით აიხსნება, რომ აქტიურად მოქმედი ეკოლოგიური ტექნოლოგიების შესაქმნელად საჭიროა სელექციურად შერჩეული აქტიური მიკროორგანიზმები და მცენარეები, რომლებიც პასუხობენ კონკრეტულ ადგილობრივ მოთხოვნებს. ეს ის ეკოლოგიური პოტენციალია, რომლის გაზრდა ნიადაგში შესაძლებელია მინიმუმ 40-50%-მდე. მიზანმიმართულად შერჩეული მიკროორგანიზმების და მცენარეების აქტიური კონსორციუმების შექმნა არ დააზიანებს ნიადაგში მიმდინარე ბუნებრივ პროცესებს. ამავდ-

როულად ტექნოლოგია გააძლიერებს ნიადაგის იმუნურ სისტემას და სრულ შესაბამისობაში იქნება გარემოსთან. განსაკუთრებით საყურადღებოა, რომ მიკროორგანიზმებზე და მცენარეებზე დაფუძნებული ტექნოლოგია მის შეუზღუდავ, გლობალური მასშტაბით გამოყენების საშუალებას მოგვცემს.

ნიადაგი პლანეტის უკიდურესად მნიშვნელოვანი თხელი ფენაა, რომლის სისქე 20-დან 150 სანტიმეტრამდეა და გარს არტყია მთელი დედამიწის ხმელეთს. პლანეტის სხვადასხვა ნაწილში ნიადაგის ფუნქციური აქტიურობა და, შესაბამისად, ნაყოფიერება მნიშვნელოვნად განსხვავდება. მიწის უფრო ღრმა ფენებშიც (2 მეტრი და მეტი) შეინიშნება ქიმიური ნაერთების გარკვეული გარდაქმნები, რაც განპირობებულია როგორც აერობული, ისე ანაერობული მიკროორგანიზმების მოქმედებით. უნდა აღინიშნოს, რომ უფრო ქვედა ფენაში (4 მეტრზე მეტ სიღრმეში) გადის საზღვარი, რომელიც ყოფს პლანეტას სიცოცხლისუნარიან, მეტაბოლიტურად აქტიურ ნიადაგის ზედა ნაწილად და გაცილებით უფრო ინერტულ (ბიოლოგიური ტრანსფორმაციის თვალსაზრისით) ნაწილად (ნახ. 39).



ნახ. 39. პლანეტა ქრილში.

ნიადაგი ძირითადად წარმოადგენს ჰუმუსს, რომელიც ორგანულ ნაერთებს, კოლოიდებს, წყალს, მიკროორგანიზმებს და მინერალებს სხვადასხვა თანაფარდობით შეიცავს. პლანეტის ეკო-

ლოგიური მდგომარეობის გაუარესებასთან დაკავშირებით უნდა აღინიშნოს ნიადაგის და ნიადაგს ქვემოთ მდებარე შრის მნიშვნელოვანი ეკოლოგიური ფუნქცია, რაც, გარდა დამახასიათებელი მეტაბოლიტური პროცესებისა, მოახდინოს სხვადასხვაგვარ ტოქსიკურ ნაერთთა გაუვნებელყოფაში მდგომარეობს. ამ პროცესის არსია ნიადაგში მოხვედრილი ტექნოგენური ნაერთების გარდაქმნა უვნებელ კომპონენტებად.

მიწის სიღრმეში არსებული მაღალტემპერატურულ პირობებში მდულარე მასა, ქიმიური სინთეზის კოლოსალური პოტენციალით, რომლის ტემპერატურა 600-800°C-ს, ხოლო ასთენოსფეროში 1200 °C-მდე აღწევს, წარმოადგენს ნიადაგისთვის არაადამახასიათებელ და სტაბილურ ქიმიურ ნაერთთა წარმოქმნის მძლავრ წყაროს. ესენია მიწის წიაღში, მინერალებით მდიდარ არეში, მაღალტემპერატურული რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი მდგრადი ნაერთები, რომელთა ნაწილიც დიფუზიის შედეგად აღწევს ნიადაგის ზედაპირს, და თუ არა ნიადაგის უნარი, მოახდინოს მათი დიდი უმრავლესობის შეზოჭვა და ბუნებისთვის დამახასიათებელ ნაერთებად გარდაქმნა, ლითოსფეროს ქვემო ნაწილის ქიმიური შედგენილობა მნიშვნელოვნად შეიცვლებოდა. ნიადაგის, როგორც პლანეტის ხმელეთის საფარის განსაკუთრებულ ეკოლოგიურ როლს თუ შევაფასებთ, უნდა აღინიშნოს, რომ ნიადაგი, გარემოს და თავის პოტენციალის წყალობით, ახდენს ტოქსიკური ნაერთების უმრავლესობის ტრანსფორმაციას ჩვეულებრივ ბუნებრივ კომპონენტებად. ეს ნივთიერებები, როგორც მაღალტემპერატურული სინთეზის პროდუქტები, ხასიათდება მაღალი სტაბილურობით, ბიოტურ და აბიოტურ პირობებში. მიუხედავად ამ ნაერთების ნელი ტემპით დიფუზიისა, მათი ნაწილი მაინც აღწევს ნიადაგის საფარს და ხდება ატმოსფეროს კომპონენტი. ამ ნაერთთა ტრანსფორმაციულ პროცესებში მონაწილეობას იღებს ნიადაგის ბინადარი ორგანიზმების უმრავლესობა, თუმცა ამ პროცესში ლომის წილი მიუძღვით რიზოსფერულ მიკროორგანიზმებს და მცენარეთა ფესვთა სისტემას. ამგვარად, სწორედ ნიადაგია ბუნების ის მთავარი კომპონენტი, რომელიც ახდენს მიწის ღრმა წიაღში და მიწისზედა ატმოსფეროში წარმოქმნილი ტოქსიკური ნაერთების გარდაქმნას ბუნებისთვის დამახასიათებელ კომპონენტებად.

რა პროცესები მიმდინარეობს ნიადაგის შიგნით? ამ საკმაოდ რთულ პროცესებს დედამიწის შემსწავლელი მეცნიერები იკვლევენ. დადგენილია, რომ გარემოსთან კონტაქტის საშუალებით ნიადაგს მიუძღვის უნიკალური როლი სასიცოცხლოდ აუცილებელი ეკოლოგიური ბალანსის შენარჩუნებაში. რაც შეეხება ნიადაგის კავშირს ატმოსფეროსთან, აქ სხვა ვითარებაა. ტოქსიკური ნაერთები, ტრანსპორტის, ენერგეტიკის, ნავთობის მოპოვების და გადამუშავების, სოფლის მეურნეობის და მრეწველობის და სხვა დარგების ემისიის პროდუქტები, ჰაერთან შედარებით მაღალი სიმკვრივის გამო თავსდება ნიადაგიდან დაახლოებით 150 სანტიმეტრის სიმაღლემდე. ყველა ეს ნივთიერება, საბოლოო ჯამში, თავს ნიადაგში იყრის. ნიადაგი, რომელსაც სრულიად განსაზღვრული ტრანსფორმაციული პოტენციალი ახასიათებს, ვერ ახერხებს ატმოსფეროში მნიშვნელოვნად გაზრდილი კონცენტრაციების მქონე ტოქსიკური კომპონენტების გაუვნებელყოფას. ნიადაგის მიკროორგანიზმების (ბაქტერიები, მიცელიალური სოკოები, აქტინომიცეტები) - ტოქსიკურ ნაერთთა აქტიური დესტრუქტორების სელექცია და ნიადაგში მათი შეტანა, ფესვთა სისტემასთან ერთად, რომელიც აქტიურად გარდაქმნის ტოქსიკურ კომპონენტებს, 10-ჯერ და მეტად ზრდის ნორმალური ნიადაგის რემედიაციულ პოტენციალს და მუდმივად და აქტიურად მოქმედ, ეკოლოგიური მონიტორინგისა ბიოტექნოლოგიას წარმოადგენს. მნიშვნელოვანია ისიც, რომ შემოთავაზებული ბიოტექნოლოგია, ტოქსიკური ნაერთების დეგრადაციის გარდა, გარკვეულწილად გარემოში ელემენტთა წრებრუნვასაც აბალანსებს, იყენებს რა ტოქსიკურ ნაერთთა შედგენილობაში შემავალს ატომებს ბუნებრივი ნაერთების სინთეზში.

ახლი ეკოლოგიური რემედიაციული ბიოტექნოლოგიის გამოყენების ნებისმიერ მასშტაბს მხოლოდ სარგებლობის მოტანა შეუძლია. განსაკუთრებით მიზანშეწონილია მათი გამოყენება იმ ადგილებში, სადაც ტოქსიკურ ნაერთთა კონცენტრაცია აღემატება ზღვრულად დასაშვებ კონცენტრაციებს (ზდკ) და რეალურად იქმნება კრიტიკული საარსებო პირობები. ასეთ რეგიონები საკმაოდ ბევრია პლანეტაზე. ტექნოლოგია ინტერესს წარმოადგენს ეკოლოგიურად საშიში რეგიონების მუდმივი მონიტორინგის თვალსაზრისითაც, რაც შეეხება მისი გამოყენების გლობალურ მასშტაბებს,

სავსებით ცხადია, რომ ეს მასშტაბი შეუზღუდავია, რადგან მცენარეთა (ბალახოვანი, ბუჩქოვანი, ხე-მცენარეები) კულტივირება და მიკროორგანიზმების შესაბამისი ფორმების ნიადაგში შეტანა მთელ პლანეტაზეა შესაძლებელი. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ის ფაქტი რომ, ამ მიზნისთვის გამოყენებული მიკროორგანიზმების და მცენარეების კოლექციები, რომლებიც ადაპტირებულია არსებობის თუნდაც ექსტრემალურ პირობებში, ბუნებაში არსებობენ, რაც წარმოადგენს ტექნოლოგიის წარმატებული რეალიზაციის გარანტიას სავარაუდოთ მთელი პლანეტის მასშტაბით.

შემოთავაზებული ტექნოლოგია, პლანეტის სრული დეტოქსიკაციის მიზნით გლობალური ხასიათისაა და მისი რეალიზაციის წარმატება ყველა ან უმრავლესი ქვეყნების ურთიერთთანამშრომლობით განისაზღვრება. მოცემული ტექნოლოგიის რეალიზაციაში უნდა ჩაერთოს ყველა კატეგორიის მიწის რესურსები: სასოფლო-სამეურნეო პლანტაციები, სატყეო ფონდები, დასახლებული მიწების ნაკვეთები, დასვენების ადგილები, განსაკუთრებით, დაცული ტერიტორიები, ყოფილი და არსებული სამხედრო დისლოკაციის ადგილები და პოლიგონები. განსაკუთრებული ყურადღება უნდა დაეთმოს ომგადატანილი ქვეყნების ნიადაგებს და წყალსატევებს, რომლებიც, დიდი ალბათობით, შეიცავს ტოქსიკურ ნივთიერებებს და/ან მათი ნაწილობრივი ტრანსფორმაციის ასევე ტოქსიკურ შუალედურ ნაერთებს.

რას მოგვემდოა ზემოაღწერილი ბიოლოგიური კონცეფციის მთელი პლანეტის მასშტაბით გამოყენება?

პირველ რიგში, უფასო მზის ენერჯის გაცილებით უფრო ეფექტური გამოყენების შესაძლებლობას, რისი საშუალებითაც შეიძლება მივაღწიოთ მცენარეული ბიომასის საშუალებით ნიადაგის იმუნური სისტემის ამაღლებას. გასათვალისწინებელია, რომ ენერჯის ალტერნატიული წყაროების ძიებისას, მზის ენერჯია წარმოადგენს მის ძირითად ფორმას, რომელსაც ჩვენ პლანეტაზე ანალოგი არ გააჩნია.

მეორე: აქტიური, სელექციურად შერჩეული მცენარეებისა და რიზოსფერული მიკროორგანიზმების საბინადრო ფართობების მნიშვნელოვანი გაზრდა, რაც წარმოადგენს პლანეტის დამცველ ფორმას ეკოლოგიური სტრესებისგან; პლანეტის უზარმაზარი გა-

მოუყენებელი რეზერვების ჩართვა ეკოლოგიურ ტექნოლოგიებში; წყლის რესურსების მქონე პლანეტის სეგმენტების გამლიერება, რაც განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია სასოფლო-სამეურნეო კულტურების ყველა სახეობის მოვლა-პატრონობაში.

აღწერილი ეკოლოგიური ტექნოლოგიების რეალიზაცია, რომლებიც არ არღვევს ბუნებრივ სტრუქტურებს და ეკოლოგიურ ბალანსს, უდაბნოს დიდი მასივების ათვისების და მცირემოსავლიანი მიწების გაკეთილშობილების მნიშვნელოვანი ფაქტორი გახდება. მხოლოდ პლანეტის ცენტრალურ ნაწილში, აფრიკის ჩრდილოეთით და მასთან მოსაზღვრე აზიის ნაწილში (საუდის არაბეთი და სხვ.) გაუდაბნობულ მიწის ფართობი 11 630 400 კმ²-ს შეადგენს, რაც, ჯერ კიდევ წარმოადგენს პლანეტის გამოუყენებელ პოტენციალს. ნათელ მაგალითს წარმოადგენს ეგვიპტე, ოდესღაც აყვავებული ქვეყანა, რომელიც უდაბნოდ გადაიქცა და რომელშიც ამჟამად ქვეყნის ეკონომიკის 80%-ის განლაგებულია მსოფლიოს ერთ-ერთ ყველაზე წყალუხვ მდინარე ნილოსის დელტაში. თვით მდინარის სიგრძე 700 კილომეტრს აღემატება და, შესაბამისად, მას მთლიანად აფრიკის კონტინენტის გამწვანებაში, როგორც მტკნარი წყლის აუზს, დიდი მონაწილეობა შეუძლია მიიღოს. წყალდიდობისას მდინარე ყოველწლიურად გადმოდის ნაპირებიდან და მიმდებარე ნიადაგს შლამით ანოყიერებს. ნილოსის კალიუმით მდიდარი ჰუმუსი მოსავლიანობისთვის უმნიშვნელოვანეს ფაქტორს წარმოადგენს.

მოსალოდნელი ეკოლოგიური კატასტროფა გარკვეულწილად პლანეტის მთელ მოსახლეობას ეხება. ნიადაგის გაკეთილშობილება და მიწების ეფექტიანი გამოყენება ყველა სახელმწიფოსათვის ზოგადსაკაცობრიო ამოცანა უნდა გახდეს. საზოგადოების რთული ეკოლოგიური პერსპექტივებიდან გამომდინარე, შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ უახლოეს მომავალში ეკოლოგიური კეთილდღეობა სერიოზულ გავლენას მოახდენს გეოპოლიტიკურ ურთიერთობებზეც. სწორედ პლანეტის ეკოლოგიური უსაფრთხოების ფაქტორი უნდა იქცეს იმ წარმმართველ ვექტორად, რომელიც აიძულებს საზოგადოებას, სასიცოცხლოდ აუცილებელი ეკოლოგიური კეთილდღეობა პოლიტიკაზე და ეკონომიკურ ვითარებაზე მაღლა დააყენოს.

ნაშრომში წარმოდგენილი მეგაეკოლოგიური პროექტი, უდავოდ ძვირადღირებული ღონისძიებაა, რომლის პირველი ეტაპი სიცოცხლისთვის და აგრარული მიზნებისთვის არახელსაყრელი მიწის რესურსების გაკეთილშობილებაში მდგომარეობს. შემდგომი ეტაპი ითვალისწინებს ბიოეკოლოგიური ტექნოლოგიების რეალიზაციას მთელი პლანეტის მასშტაბით, რაც მნიშვნელოვანი ნაბიჯი იქნება მსოფლიო საზოგადოების სტაბილურობის შენარჩუნებაში, პლანეტის მოსახლეობის ძნელადპროგნოზირებადი ზრდის პირობებშიც კი.

მასშტაბური ეკოლოგიური და სოციალური პროექტების შექმნა, რომლებიც სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანი პრობლემების გადაჭრას ეხება, დიდი ხნის განმავლობაში მომწიფებულ, აუცილებელ და საყოველთაო უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს.

და ბოლოს კიდევ ერთხელ უნდა ხაზგასმით აღინიშნოს თუ რა კავშირშია წიგნში წარმოდგენილი მასალა დედამიწის ეკოლოგიურ და სასურსათო პოტენციალთან. მოგეხსენებათ, რომ ბუნებაში მიმდინარე პროცესები ორგანულად არიან ურთიერთ დაკავშირებულნი. რაში მდგომარეობს ეს? მაგალითად ყველა ცოცხალი ორგანიზმის არსებობა პირველ რიგში განისაზღვრება თუნდაც მინიმალურ საარსებო გარემოთი. ბუნების ნაყოფიერება გამოხატული მის ბიომრავალფეროვნებაში, ეკოლოგიურ ბალანსში და მოსავლიანობაში (მცენარეები, ცხოველები,...) კაცობრიობის არსებობის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს. მონოგრაფიაში წარმოდგენილი მასალა, სადღეისოდ შექმნილ რთულ ეკოლოგიურ პირობებში, სწორედ ამ, თუნდაც მინიმალურად აუცილებელ სასიცოცხლო პირობების შენარჩუნებასა და გაუმჯობესებას ემსახურება. ის ჭეშმარიტება, რომ ტოქსიკური ნაერთებით გაბინძურებულ გარემოში არ შეიძლება სრულფასოვანი და ქიმიური შემადგენლობით მაღალი ხარისხის მოსავლის მიღება, არ საჭიროებს მტკიცებას. აი, სწორედ აქ მყარდება ძალიან მჭიდრო კავშირი ეკოლოგიასა და სურსათს შორის. ტოქსიციზმით შესაძლებელია არა მარტო ადამიანების, არამედ ცხოველების და მცენარეების დაავადებაც, რასაც, დროთა განმავლობაში, იმ ღონის უარყოფითი შედეგები და ცოცხალ ორგანიზმებში ანომალიები შეიძლება მოჰყვეს, რომელსაც დღეს ვერც კი წარმოვიდგენთ. სამწუხაროდ ამის ნიშნები უკვე არსებობს.

ნიადაგის გასუფთავება და მისი მუდმივი მონიტორინგი სურსათით კაცობრიობის უზრუნველყოფის უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს. ტოქსიური ნაერთებით გაბინძურებული ნიადაგები, წყალსატევები და შესაბამისად დაავადებული ყველა არსებული ორგანიზმები, კაცობრიობას დიდი საშიშროებით ემუქრება. სწორედ ეს არის ის არასრულად რეალიზებული ეკოლოგიური და სასურსათო პოტენციალი რომელიც აუცილებლად უნდა იქნეს გამოყენებული. მითუმეტეს, რომ სრულფასოვანი სურსათი ნებისმიერი ერის არსებობის და წინსვლის უპირობო აუცილებლობას წარმოადგენს.

ლიტერატურა

1. Kulshrestha U, Saxena P (2016) Plant Responses to Air Pollution. Singapore Springer 194 p.
2. Kannan Pakshirajan, Eldon R. Rene, and Aiyagari Ramesh Biotechnology in Environmental Monitoring and Pollution Abatement 2015. Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International Volume 2015, Article ID 963803, 3 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/963803>
3. <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>
4. <https://www.foodnavigator.com/Article/2017/04/07/Potok-explains-air-decontamination-technology>
5. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/92/PDF/N1529192.pdf?OpenElement>
6. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021) Synthesis Report 2021. <https://www.fao.org/3/cb7654en/online/cb7654en.html>.
7. Allan J.A. (1998) Virtual water: a strategic resource. Global solutions to regional deficits. Groundwater, 36(4), 1998. P. 545-546.
8. <https://e360.yale.edu/features/ozone-pollution-an-insidious-and-growing-threat-to-biodiversity>.
9. Barbier, Edward. A Global Green New Deal, Report prepared for the Green Economy Initiative of UNEP., 2009. <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&type=400&nr=670&menu=1515>
10. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/double-trouble-plastics-found-emit-potent-greenhouse-gases>.
11. Садковская Н. Е. Особенности выбросов загрязняющих веществ от промышленного производства в городах. Научно-технические проблемы. - 2014. - Т. 14. № 2. - С. 34-35.
12. Pidwirny M. Formation of acid deposition. <http://royal.okanagan.bc.ca/mpidwirn/atmosphereandclimate/formaciddep.html>. 1996.

13. Фелленберг Г. Загрязнение природной среды. М.: Мир, 1997. 232 с.
14. Ware G, Kuschner MD, Paul D, Blanc MD, MSPH. Acute Responses to Toxic Exposures. Murray & Nadel's Textbook of Respiratory Medicine, 103, 1435-1446.e7] ... [S.C.Gad. Sulfur Dioxide. Reference Module in Biomedical Sciences. Elsevier. Encyclopedia of Toxicology (Third Edition). 2014, Pages 420-423.
15. Peterson J.S., Cairns C.B. Toxicity, nitrous dioxide. <http://www.emedicine.com/emerg/topic847.htm>. 2003.
16. Boden T.A., Kaiser D.P., Sepanski R.J., Stoss F.W. Trends 93: a compendium of data on global change. Carbon Dioxide. Information Analysis Center Communications. 1994. V. 20. P. 8-10.
17. O'Brien C. Success for carbon dioxide burial. http://www.newscientist.com/news/news.jsp?id=ns_99992779. 2002.
18. Тарко А. М. Моделирование глобального биогеохимического цикла углерода с учетом сезонной динамики и анализ динамики концентрации CO₂ в атмосфере /А. М. Тарко, В. В. Усатюк. Доклады Академии наук. - 2015. - Т. 448.- № 6. - С. 711–714.
19. Kumar P., Moran D. J. TERI Inform Digest Energy Environ. 2002. V. 1. P. 445–456.
20. Sincero A.P.P., Sincero G.A. Environmental engineering: a design approach. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
21. Эйхлер В. Яды в нашей пище. М.: Мир, 1985. 213 с.
22. Шлегель К. Д., Верхотуров С. С. Токсикологические свойства газообразных загрязнений и их влияние на организм человека. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – №. 12., 55.
23. Стройков Ю. Н. Клиника, диагностика и лечение поражений отравляющими веществами. Ю.Н. Стройков. - Москва: ИЛ, 2014. - 176 с.
24. Hou HJM, Najafpour MM, Moore GF, Allakhverdiev SI 2017. Photosynthesis: Structures, Mechanisms, and Applications. Springer, Science, 417 p.

25. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=387228>
26. Islam MR, Rahman MS (2020) Sustainable Water Purification. John Wiley & Sons. 352 p.
27. Joseph James Whitworth. Industry searching for energy-saving and safe air decontamination – Potok. <https://www.foodnavigator.com/Article/2017/04/07/Potok-explains-air-decontamination-technology>.
28. Agathos S, Walter Reineke W (2002) Biotechnology for the Environment: Soil Remediation. Springer Science & Business Media, 142 p.
29. Kvesitadze G., Kvesitadze E., Degradation of anthropogenic contaminants by higher plants. In: Complexity and Security J.J. Ramsden and P.J. Kervalishvili (Eds.) IOS Press, Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokyo, Washington, DC. 2008, 277-298 p.
30. Giorgi Kvesitadze, Gia Khatisashvili, Tinatin Sadunishvili. Metabolism of ¹⁴C-containing contaminants in plants and microorganisms: in: Dharmendra Kumar Gupta Clemens Walther Editors: Radionuclide Contamination and Remediation Through Plants, 978-3-319-07664-5, 320979, pp 254-270. Springer.
31. Food and Agriculture Organization of the United Nations. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point (SOLAW 2021) Synthesis Report 2021. <https://www.fao.org/3/cb7654en/online/cb7654en.html>.
32. <https://www.grida.no/resources/5507>
33. Bhandari A, Surampalli RY, Champagne P, Tyagi RD, Ong SK, Lo IMC (2007) Remediation Technologies for Soils and Groundwater. American Society of Civil Engineers, 449 p.
34. Giorgi Kvesitadze, Besarion Ch. Meskhi, Gia Khatisashvili. Three Stage Biotechnology for the Rehabilitation of Soils Polluted With Explosives. Scientific almanac of the Black Sea countries. 2018. T. 13. № 1. DOI 10.23947/2414-1143-2018-13-1-60-77. UDC 57. ctp. 53-67.
35. Jessica L. Barnes J.L., Zubair M., John K., Poirier M.C., Martin F.L. Carcinogens and DNA damage. Biochemical Society Transactions. 2018. <https://doi.org/10.1042/BST20180519>.

36. <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/types-pesticide-ingredients>
37. De Albergaria JTVS, Hendrikus P. A. Nouws HPA (2016) Soil Remediation: Applications and New Technologies. CRC Press, Nature, 174 p.
38. Bhattacharya S, Gupta AB, Gupta A, Pandey A (2018) Water remediation. Springer, Singapore. 246 p.
39. Boyd CE (2020) Water quality: an introduction. Springer, Nature Switzerland. 440 p.
40. Wei Z, Van Le Q, Peng W, Yang Y, Yang H, Gu H, Lam SS, Sonne C. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil. *J Hazard Mater.* 2021 Feb 5;403:123658. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123658
41. Hasegawa H, Rahman IMM, Rahman MA (2015) Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils. Springer, Technology & Engineering, 254 p.
42. <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
43. <https://www.ku.ac.ae/pulling-salt-out-of-seawater-with-magnets>
44. https://www.researchgate.net/publication/340978826_Desalination_of_Brackish_Water_Seawater_via_Selective_Magnetic_Separation
45. Liu, S. H., Zeng, G. M., Niu, Q. Y., Liu, Y., Zhou, L., Jiang, L. H., et al. 2017. Bioremediation mechanisms of combined pollution of PAHs and heavy metals by bacteria and fungi: a mini review. *Bioresour. Technol.* 224, 25–33. Doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.095
46. Quero, G. M., Cassin, D., Botter, M., Perini, L., and Luna, G. M. (2015). Patterns of benthic bacterial diversity in coastal areas contaminated by heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs). *Front. Microbiol.* 6:1053. Doi: 10.3389/fmicb.2015.01053
47. Liu, Y.J. and H. Ding, (2008). Variation in air pollution tolerance index of plants near a steel factory: Implications for landscape-plant

- species selection for industrial areas. WSEAS Trans. Environ. Dev., 4: 24-32.
48. Дмитренко В.П., Сотникова Е.В., Черняев А.В. Экологический мониторинг техносферы: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 36 8 с.
49. Natural Resource Council Committee on Oil in the Sea. Global marine oil pollution information gateway. <http://oils.gpa.unep.org/facts/sources.htm>. 2003.
50. Robertson LW, Hansen LG, eds. (2004). PCBs: Recent advances in environmental toxicology and health effects. Lexington, KY: University Press of Kentucky. p. 11. ISBN 978-0813122267.
51. Gill R.T., Harbottle M.J., Smith J.W.N., Thornton S.F. (2014) Electrokinetic-enhanced bioremediation of organic contaminants: a review of processes and environmental applications. Chemosphere. 107, 31-42.
52. Kahn, A.J. & Kamerman, S.B. (2000). International aspects of social policy. In J. Midgley, M.B. Tracy & M. Livermore, The Handbook of Social Policy (pp. 479-492). Thousand Oaks: Sage Publications.
53. Barnes J.L, Zubair M., John K., Poirier M.C., Francis L. Martin F.L. Carcinogens and DNA damage. Biochemical Society Transactions. 2018, <https://doi.org/10.1042/BST20180519>.
54. Sun G.F., Pi J.B., Li B., Guo X.Y., Yamavchi H., Yoshida T. 4th Int Conf on Arsenic Exposure and Health Effects. San Diego: Soc Geochem and Health, 2000.
55. Adamia G, Khatisashvili G, Varazashvili T, Pruidze M, Ananiashvili T, Gvakharia V, Adamia T, Gordeziani M (2003) Determination of the type and rate of soil contamination with heavy metals and organic toxicants on the territories of military proving grounds in Georgia. Bull Georg Acad Sci 167: 155-158
56. Русин В.Я. Вредные химические вещества. Л.: Химия, 1989. С. 415-436.
57. Shuangxing Hou, Lianfang Yuan, Pengpeng Jin , Bojun Ding , Na Qin , Li Li , Xuedong Liu, Zhongliang Wu, Gang Zhao, Yanchun

- Deng. A clinical study of the effects of lead poisoning on the intelligence and neurobehavioral abilities of children. *Theoretical Biology and Medical Modelling* v. 10, Article number: 13 (2013), pp. 9. doi:10.1186/1742-4682-10-13.
58. Goyer R.A. Casarett and Doull's Toxicology: the basic science of poisons, 5th edn., New York: McGraw-Hill, 1996.
 59. United Nations Environment Programme (UNEP), Environment for development perspectives: Mercury use in ASGM, (Geneva, 2011).
 60. Корте Ф., Бахадир М., Клайн В., Лай Я.П., Парлар Г., Шойнерт И. *Экологическая химия*. М.: Мир, 1996. 395 с.
 61. Nordberg G., Jin T., Leffler P., Svensson M., Zhou T., Nordberg M. Metallothioneins and diseases with special reference to cadmium poisoning. *Analisis*. 2000. V. 28. P. 396.
 62. Samoiloff M. Benzene toxicity. Benzene and derivatives. *Organic chemistry* 3. <http://xnnet.rrc.mb.ca/martins/Organic%203/benzene.htm>. 1998.
 63. Дурмишидзе С.В. Биотрансформация ксенобиотиков в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 1988. С. 4–78.
 64. Baker, A. J. M., McGrath, S. P., Sidoli, C. M. D. and Reeves, R. D. 1995. The potential for heavy metal decontamination. *Mining Environmental Management*. September, pp. 12-14.
 65. Salt, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I. and Raskin, I. (1995) Phytoremediation. A Novel strategy for the Removal of Toxic Metals from the Environment Using Plants. *Biotechnology*, 13, 468-474.
<http://dx.doi.org/10.1038/nbt0595-468>
 66. Brown S.L., Chaney R.L., Angle J.S., Baker A.J.M. *J. Environ. Qual.* 1994. V. 23. P. 1151–1157.
 67. Konradsen F., Van der Hoek W., Amerasinghe F.P., Mutero C., Boelee E. Engineering and malaria control: Learning from the past 100 year. *Acta Trop.* 2004. V. 89. P. 99–108.
 68. Commoner B. The political history of dioxin. <http://www.greens.org/s-r/078/07-03.html>. 1994.

69. Atkinson M.J. Alkaline phosphatase activity of coral reef benthos. *Coral Reefs*. 1987. V. 6. P. 59–62.
70. Guttus S, Failing K, Neumann K, Kleinstejn J, Georgii S, Brunn H (1998) Chlororganic pesticides and polychlorinated biphenyls in breast tissue of women with benign and malignant breast disease. *Arch Environ Contam Toxicol* 35:140–147.
71. McElroy JA, Kanarek MS, Trentham-Dietz A, Robert SA, Hampton JM, Newcomb PA, Anderson HA, Remington PL (2004) Potential exposure to PCBs, DDT, and PBDEs from sport-caught fish consumption in relation to breast cancer risk in Wisconsin. *Environ Health Perspect*, 112: 156–162.
72. Fokin AV, Kolomiets AF (1985) Dioxins – scientific or social problem? (in Russian). *Nature (Moscow)* 3: 3–15.
73. Korte F., Kvesitadze G., Ugrekhelidze D., Gordeziani M., Khatisashvili G., Buadze O., Zaalishvili G., Coulston F. (2000) Review: Organic toxicants and plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2000, 47, 1, 1-26.
74. Ugrekhelidze, D., Korte, F., Kvesitadze, G. (1997) Uptake and transformation of benzene and toluene by plant leaves. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 37, 24-28.
75. Guttus S, Failing K, Neumann K, Kleinstejn J, Georgii S, Brunn H (1998) Chlororganic pesticides and polychlorinated biphenyls in breast tissue of women with benign and malignant breast disease. *Arch Environ Contam Toxicol* 35:140.
76. Korte F, Behadir M, Klein W, Lay JP, Parlar H, Sceunert I (1992) *Lehrbuch der ökologischen chemie. Grundlagen und Konzepte für die ökologische Beurteilung von Chemikalien*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart New York.
77. Andrews LS, Snyder R (1991) Toxic effects of solvents and vapors. In: Amdur MO, Doull J, Klaassen CD (eds) *Casarett and Doull's toxicology*. 4th edn. McGraw Hill, New York, pp 693–694.
78. Mithaishvili T, Scalla R, Ugrekhelidze D, Tsereteli B, Sadunishvili T, Kvesitadze G (2005) Transformation of aromatic compounds in

- plants grown in aseptic conditions. *Z Naturforsch C Biosci* 60c: 97-102
79. Bergen BJ, Nelson WG; Pruell RJ (1993). "Bioaccumulation of PCB Congeners by Blue Mussels (*Mytilus edulis*) deployed in New Bedford Harbor, Massachusetts". *Environ Toxic Chem* 12: 1671-1681. doi:10.1002/etc.5620120916
 80. Chekol T, Vough LR, Chaney RL (2002) Plant-soil-contaminant specificity and phytoremediation of organic contaminants. *Int J Phytoremediation* 4: 17-26.
 81. Curfs DM, Beckers L, Godschalk RW, Gijbels MJ, van Schooten FJ (2003) Modulation of plasma lipid levels affects benzo[a]pyrene-induced DNA damage in tissues of two hyperlipidemic mouse models. *Environ Mol Mutagen* 42: 243-249).
 82. Bunge M, Adrian L, Kraus A, Opel M, Lorenz WG, Andreesen JR, Görisch H, Lechner U (2003) Reductive dehalogenation of chlorinated dioxins by an anaerobic bacterium. *Nature* 421: 357-360.
 83. Квеситадзе Г.И., Хатисашвили Г.А., Садунишвили Т.А., Евстигнеева З.Г. (2005) Метаболизм антропогенных токсикантов в высших растениях. Москва, Наука, 199 с.
 84. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2006). Toxicological profile for vinyl chloride. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp20.pdf>.
 85. Стокер Х.С., Сигер С.Л. Химия окружающей среды. М.: Химия, 1982. С. 346-370.
 86. Tolls J., de Graaf I., Thijssen M.A.T.C., Haller M., Sijm D.T.H.M. *Environ. Sci. Technol.* 1997. V. 31. P. 3426-3431
 87. Opresko D.M. Toxicity summary for 2,4,6-trinitrotoluene. http://risk.lsd.ornl.gov/tox/profiles/2_4_6_trinitrotoluene_f_V1.shtml. 1998.
 88. Banerjee HN, Verma M, Hou LH, Ashraf M, Dutta SK (1999) Cytotoxicity of TNT and its metabolites. *Yale J Biol Med* 72: 1-4.
 89. Robidoux P.Y., Hawari J., Thiboutot S., Ampleman G., Sunahara G.I. TNT, RDX, and HMX Decrease Earthworm (*Eisenia andrei*)

- Life-Cycle Responses in a Spiked Natural Forest Soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 1999. V. 44. P. 311–321.
90. Esteve-Núñez A., Caballero A., Ramos J.L. Biological degradation of 2,4,6-trinitrotoluene. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2001. V. 65. P. 335–352.
91. EPA. Introduction on phyto-remediation EPA/600/R-99/107 www.epa.gov/swertiol/download/remed/introphyto.pdf. 2000.
92. Hannink N, Rosser SJ, French CE, Basran A, Murray JA, Nicklin S, Bruce NC (2001) Phytodetoxification of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase. *Nat Biotechnol* 19: 1168-1172.
93. Spencer W.F., Farmer W.J., Cliath M.M. Pesticide volatilization. *J. Residue Rev.* 1973. V. 49. P. 1–47.
94. Федоров Л.А. Необъявленная химическая война в России: политика против экологии. Центр экологической политики России. <http://www.seu.ru/cgi/lib/books/chemwar/index.htm>. 1995.
95. <https://wedocs.unep.org/xmlui/bitstream/handle/20.500.11822/36963/POLSOL.pdf>
96. <https://www.facepla.net/the-news/energy-news-mnu/6059>
97. Lieuven T., Yang V., Yetter R. [Edit]. *Synthesis Gas Combustion. Fundamentals and Applications.* CRC Press, New York. 2010. 384p
98. Kvesitadze G., Gordeziani M., Khatisashvili G., Sadunishvili T., Ramsden J.J. (2001) Review: Some aspects of the enzymatic basis of phytoremediation. *Journal of Biological Physics and Chemistry*, 1, 2, 49-57.
99. Gill R.T., Harbottle M.J., Smith J.W.N., Thornton S.F. (2014) Electrokinetic-enhanced bioremediation of organic contaminants: a review of processes and environmental applications. *Chemosphere*. 107, 31-42.
100. Speight J. (2017) *Natural Water Remediation: Chemistry and Technology.* Elsevier, Butterworth-Heinemann Inc. 392 p.
101. Гуславский А. И., Канарская З. А. Перспективные технологии очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов Текст научной

- статьи по специальности «Экологические биотехнологии»
<https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-tehnologii-ochistki-vody-i-pochvy-ot-nefti-i-nefteproduktov>
102. V. Odaruk, S. Tronin. Plasma-Chemical Technology of Clearing Industrial Waste Water, Waste Gas, Oil Refining, Municipal Solid Waste (MSW) and Industrial Waste. *Civil Security Technology*, Vol. 11, 2014, No. 3 (41)
103. Березин А.В. применение совмещенной плазменно-каталитической технологии для окисления вредных веществ. ООО «Электроэкология»/Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет). УДК 66.088:66.074.3. <https://www.sworld.com.ua/konfer21/723.htm>
104. Бруно Латур. Политики природы. Как привить наукам демократию. Ад Маргинем. 2018, с. 336.
105. Инновационные технологии проведения биорекультивации и биоремедиации почв. <http://www.ecovestnik.ru/index.php/2013-07-07-02-13-50/kommentrij-specialista/2630-innovatsionnye-tehnologii-provedeniya-biorekultivatsii-i-bioremediatsii-pochvy>.
106. <http://ecology-of.ru/priroda/kakie-byvayut-metody-ochistki-pochvy-ot-zagryazneniya/>
107. Хаханина Т.И., Никитина Н.Г., Петухов И.Н. (2018) Химические основы экологии: учебник для среднего профессионального образования. Москва, Юрайт, 233 с.
108. Горбунова Т.И., Первова М.Г., Забелина О.Н., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. (2011) Полихлорбифенилы. Проблемы экологии, анализа и химической утилизации. URSS, Красанд, 400 с
109. <http://cgon.rospotrebnadzor.ru/content/62/538>
110. William W., Adams III, Ichiro Terashima. The Leaf: A Platform for Performing Photosynthesis. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93594-2>

111. Фарносова Е, Каграманов Г. Нанофильтрация и обратный осмос: сравнение и области оптимального применения. 2019.
112. Суханова А.В. Инновационные способы очистки воды, воздуха, почвы. <https://scienceforum.ru/2018/article/2018001510>.
113. <https://watermagazine.ru/nauchnye-stati2/arkhiv/23179-novaya-sorbtsionnaya-tekhnologiya-ochistki-vody-na-osnove-ispolzovaniya-modifitsirovannykh-bazaltovykh-mikrovoloknistykh-materialov.html>
114. Kvesitadze E, Sadunishvili T, Kvesitadze G (2012) Ecological Potential of Plants. Chapter 11, in: Advanced Bioactive Compounds Countering the Effects of Radiological, Chemical and Biological Agents. Strategies to Counter Biological Damage. Ed: Grant N. Pierce, Volodymyr I. Mizin, Alexander Omelchenko. Springer, 2012, p.133-143. <http://link.springer.com/book/10.1007/978-94-007-6513-9/page/2>
115. De Albergaria JTVS, Hendrikus P. A. Nouws HPA (2016) Soil Remediation: Applications and New Technologies. CRC Press, Nature, 174 p.
116. Reddy KR, Cameselle C (2009) Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater. John Wiley & Sons, Technology & Engineering, 544 p.
117. Rinklebe J, Ok Y-S, Rinklebe J, Hou D, Tsang DCW, Tack FMG (2020) Soil and Groundwater Remediation Technologies: A Practical Guide. CRC Press, Groundwater, 338 p.
118. Koul B, Pooja T (2018) Biotechnological Strategies for Effective Remediation of Polluted Soils. Springer, Singapore. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2420-8>
119. Meuser H (2013) Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land. Springer, Dordrecht; New York. 406 p.
120. Otten AM, Alphenaar A, Pijls C, Spuij F, de Wit H (2012) In Situ Soil Remediation Springer Science & Business Media, 116 p.
121. Peuke AD, Kopriva S, Rennenberg H (2004) Phytoremediation with the help of transgenic trees. In: Phytoremediation: environmental

- and molecular biological aspects. OECD workshop, Hungary, Abstr, P. 33
122. Угрехелидзе Д.Ш., Дурмишидзе С.В. (1980) Химическое загрязнение биосферы и растения. Тбилиси: Мецниереба, 94 с
123. Eckardt NA (2001) Move it on out with MATEs. *Plant Cell* 13: 1477–1480
124. Голиков Р.А., Суржиков Д.В., Кислицына В.В., Штайгер В.А. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения (Обзор литературы) // Научное обозрение. Медицинские науки – 2017.
125. Угрехелидзе Д.Ш. (1976) Метаболизм экзогенных алканов и ароматических углеводов в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 223 с.
126. Burken JG (2003) Uptake and metabolism of organic compounds: green liver model. In: McCutcheon SC, Schnoor JL (eds) *Phytoremediation. Transformation and control of contaminants*. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey, pp 59–84
127. Tinikashvili L, Varsimashvili K, Gagelidze N, Amiranashvili L, Chrikishvili D, Kirtadze E, Khatisashvili G, Ghoghoberidze M (2004) Influence of temperature on growth and degradation ability of microorganisms capable for degradation of 2,4,6-trinitrotoluene and mineral oil. *Proceed Georgian Acad Sci, Biological Series A*. 30, 4: 493–497.
128. Varsimashvili Kh, Tinikashvili L, Amiranashvili L, Gagelidze N, Kirtadze E, Khatisashvili G, Ghoghoberidze M (2004) Influence of some physicochemical factors in different microorganisms capable for degradation of 2,4,6-trinitrotoluene and mineral oil. *Proceed Georgian Acad Sci, Biological Series B*. 2: 104–109
129. Угрехелидзе Д.Ш., Дурмишидзе С.В. (1984) Поступление и детоксикация органических ксенобиотиков в растениях. Тбилиси: Мецниереба, 230 с.
130. Ohkawa H, Tsujii H, Ohkawa Y (1999) The use of cytochrome P450 genes to introduce herbicide tolerance in crops: a review. *Pestic Sci* 55: 867–874

131. Schnoor JL, Dee PE (1997) Phytoremediation. Technology Evaluation Report TE-98-01. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. Ser E. Iowa City
132. National Geographic <https://www.nationalgeographic.com/environment/habitats/desertification/>. http://rmrl.ru/blog/post_81/
133. Kvesitadze G, Khatisashvili G, Sadunishvili T, Ramsden JJ (2006) Biochemical Mechanisms of Detoxification: Basis of Phytoremediation. Berlin, Heidelberg, Springer, 262 p.
134. Coleman JOD, Mechteld MA, Kalff B, Davies TGE (1997) Detoxification of xenobiotics in plants: chemical modification and vacuolar compartmentation. *Trends Plant Sci* 2: 144–151.
135. Kurumata M, Takahashi M, Sakamoto A, Ramos JL, Nepovim A, Vanek T, Hirata T, Morikawa H (2004) Degradation of nitrocompounds by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase gene. In: *Phytoremediation: environmental and molecular biological aspects*. OECD workshop, Hungary, Abstr, P. 54.
136. Adamia G, Ghoghoberidze M, Graves D, Khatisashvili G, Kvesitadze G, Lomidze E, Ugrekhelidze D, Zaalishvili G (2006) Absorption, distribution and transformation of TNT in higher plants. *Ecotoxicol Environ Saf*, 64: 136–145.
137. Hannink N, Rosser SJ, Bruce NC (2002) Phytoremediation of explosives. *Crit Rev Plant Sci* 21: 511–538.
138. Schnoor JL, Licht LA, McCutcheon SC, Wolfe NL, Carreira LH (1995) Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environ Sci Technol* 29: 318A–323A.
139. Chrikishvili D, Sadunishvili T, Zaalishvili G (2006) Benzoic acid transformation via conjugation with peptides and final fate of conjugates in higher plants. *Ecotoxicol Environ Saf* 64, 3, 390–399.
140. Sandermann H (1994) Higher plant metabolism of xenobiotics: the “green liver” concept. *Pharmacogenetics* 4: 225–241.
141. N. Gagelidze, L. Amiranashvili, T. Sadunishvili, G. Kvesitadze, T. Urushadze, T. Kvrivishvili. Bacterial composition of different types

- of soils of Georgia. *Annals of Agrarian Science*. Volume 16, Issue 1, March 2018, Pages 17-21.
142. G. Kvesitadze. Ecology. Biological Concept. Georgian National Academy of Sciences, 2021, p. 51
143. G. Kvesitadze. Innovative environmental biotechnologies based on the action of microorganisms and plants. International scientific conference «Science, technique and innovation in the Epoch of Power and Happiness»/Academy of Sciences of Turkmenistan. 12-13 June, 2022.
144. Proft T (2009) *Microbial Toxins: Current Research and Future Trends*. Caister Academic Press. 192 p.
145. Surajit Das, Hirak Dash. *Microbial Biodegradation and Bioremediation. Techniques and Case Studies for Environmental Pollution*. Elsevier 2021. P.646. eBook ISBN: 9780323900133. Paperback ISBN: 9780323854559.
146. Alexandru Grumezescu, Alina Maria Holban. *Microbial Contamination and Food Degradation*. Academic Press 2017. P. 514. eBook ISBN: 9780128112632. Paperback ISBN: 9780128115152.
147. Amiranashvili L, Kurashvili M, Adamia G, Gagelidze N, Varsimashvili Kh, Tolordava L, Ananianiashvili T, Khatisashvili G (2014) Lindane degradation ability of *Pseudomonas* strains isolated soils of Georgia. *Annals of Agrarian Science* 12, 3: 18–21.
148. Best EPH, Kvesitadze G, Khatisashvili G, Sadunishvili T (2005) Plant processes important for the transformation and degradation of explosives contaminants. *Zeitschrift für Naturforschung*. 60c: 340–348.
149. Kurashvili M, Ananianiashvili T, Adamia G, Amiranashvili L, Gagelidze N, Khatisashvili G (2013). Selection of microorganisms for development of a novel technology for cleaning environment contaminated by organochlorine pesticides. *Transaction of the Institute of Microbiology of Azerbaijan National Academy of Sciences*, 11, 1: 293–296.

150. Martina McGuinness and David Dowling, Plant-Associated Bacterial Degradation of Toxic Organic Compounds in Soil, *J Environ Res Public Health*. 2009 Aug; 6(8): 2226–2247
151. Sadunishvili T., Kutateladze L., Urushadze T., Khvedelidze R., Zakariashvili N., Jobava M., Kvesitadze G. Cellulolytic and Xylanolytic Enzymes from Mycelial Fungi. *World Academy of Science, Engineering and Technology. Conference Proceedings, Rome, Italy, Sep 18-19, 2017, 19 (9), Part XI, p.1231.*
152. G. Kvesitadze, L. Kutateladze, T. Sadunishvili, R. Khvedelidze, T. Urushadze, N. Zakariashvili, N. Tsiklauri, M. Jobava. Selection of mycelial fungi producers of stable cellulases, xylanases and laccases for agricultural residues effective degradation. *15th International Conference on Environmental Science and Technology, Rhodes, Greece, 31 August - 2 September, 2017.*
153. Фрэнсис Фукуяма. Конец истории и последний человек. 1992. *Philosophy. C. 592.*
154. რ. გახოვიძე. გადარჩენის გზა. თბილისი, კავკასიური სახლი, 2019, 441 გვ.
155. რ. გახოვიძე და სხვ. მოწყობილობა დეზინფექციისათვის ვირუსის Covid-19-ის წინააღმდეგ. პატენტი U20222127Y.
156. გიგაური რ., ბიჭიაშვილი ნ., ბალათურია დ. საქართველოს რეგიონების რაჭა-სვანეთის დარი-შხან-შემ-ცვე-ლი მადნების წარმოების ნარჩენების მონიტორინგი და რემედიაციის შესაძლებლობები, საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, 2015, ტ.15, #1, გვ.119-122.
157. ნ. ბაგრატიონი ნ, გვერდწითელი ლ., გვახარია ვ., ჭირაქაძე ა. დარიშხანის ტოქსიკური ნარჩენებით დაბინძურების გავცელების ძირითადი და შესაძლო მიმართულებები. თბილისი, საქართველოს მეცნიერებათა ეროვნული აკადემიის მაცნე, 2014, №4, ტ. 40

ISBN 978-9941-8-5527-6



9 789941 855276