**Міграція та обмін мінеральних речовин**

*Коротка історична довідка.*У межах ландшафтознавства дос­лідженням міграції, розсіювання та акумуляції речовин займа­ється  геохімія  ландшафту.  Основи  цієї  науки  започаткували В. І. Вернадський та             *О. Є. Ферсман*69, теоретичні положення сфор­мулював у 20—30-ті роки Б. Б. Полинов, а в повоєнний час роз­винули           *О. І. Перельман*70, *М. А. Глазовська*71 та їх численні учні. В екології розвиток подібного наукового напряму пов’язаний з іме­нами Дж. Хатчинсона та Ж. Фортескью. По­чинаючи з 70-х років ХХ ст. в екології інтенсивно розвиваються дослі­дження потоків речовин в екосистемах. Особливого значення надається аналізу круговоротів поживних елементів рослин, визначення ток­сичних концентрацій різних елементів у живих організмах. Ана­логічні питання щодо ґрунтів почали розробляти ґрунтознавці та агрохіміки стосовно поверхневих вод – гідрохіміки та гідробіо­логи.

**Загальна схема.** Хімічні елементи, що становлять географічну оболонку, по-різному проявляють себе в геосистемах. Це стосуєть­ся як їх мас у геосистемі, так і особливостей поведінки – міграції  між елементами вертикальної структури, здатності включатися в круговороти, поглинатися рослинами тощо. Кожний елемент в екосистемі має власну частину. Про­те виділяються деякі загальні закономірності  потоків різних ре­човин у геосистемах, тому й існують загальні підходи до їх дослі­дження.

Загальну схему потоків мінеральних речовин у геосистемі на­ведено на рис. А.12 (додаток А). Як видно, основні вхідні потоки речовин до геосистеми надходять з атмосферними опадами R та пилом D за ра­хунок вивітрювання первинних мінералів гірських порід W, роз­чинення солей осадових порід S, у результаті господарської діяль­ності А.

З атмосферними опадами на поверхню Землі щорічно потрап­ляє 1800 млн т, або 12 т/км2, розчинних речовин, а на територію України – 7,3 млн т, або 12,1 т/км2. Найбільше цим шляхом надходить сірки (до 2,6 т/км2 у південних районах України), трохи менше – кальцію  та азоту (табл. Б.4, додаток Б). За рахунок осаду з атмо­сфери пилу до геосистем щорічно надходить до 10 т/км2 речо­вин, а в промислових регіонах – в  десятки разів більше.

Утворення легкорозчинних солей при вивітрюванні первинних мінералів – процес, що відбувається в усіх геосистемах, але ду­же повільно. Надходження ж до геосис­тем солей внаслідок розчинення солей осадових порід може бути значним у регіонах, де породи  галогенної  формації залягають близько до поверхні. В Україні такими регіонами є Прикарпаття та Закарпаття, Дніпровсько-Донецька западина, Донбас та інші, де значно поширені   соляні    відклади    (купольні структури, штоки тощо).

Мінеральні речовини, що надійшли до геосистем, можуть знаходитись у вигляді її резервного фонду або здійснювати круговорот у її вертикальному профілі. Резервний фонд становлять  речовини, що знаходяться у нерухомих формах, а також  легкодоступні  речовини, накопичені в геосистемі в надмірних кількостях, через що  вся їх маса не може бути охоплена круговоротом. Речовини резервного фонду частково поповнюються за рахунок мігруючих  речовин і також можуть включатися в міграційні процеси. Ці процеси зумовлені двома основними факторами: потоком води та її властивостями як хімічної речовини (гідрогенезом); синтезом та розчиненням органічної речовини (біо­генезом).

Роль води як фактора міграції речовин полягає не тільки в її мобільності в геосистемі. У її водному середовищі відбувається переважна більшість хімічних реакцій. Потік води у вертикаль­ному профілі геосистеми супроводжується процесами розчинення, вилужування, іонного обміну, адсорбції, в результаті чого хі­мічні  елементи та сполуки певних геомас переходять до водного розчину і далі переміщаються з ним. Внаслідок випаровування вологи, кристалізації, сорбції та інших гідрогенних процесів з вод­ного розчину випадають мінеральні речовини, акумулюючись у певних геомасах або геогоризонтах. Нарешті, практично тільки з водним розчином мінеральні речовини з ґрунту можуть потрапи­ти до рослин і далі взяти участь у біогенній міграції по трофічній сітці геосистеми.

Фізико-хімічні, термодинамічні та інші умови геогоризонту, крізь який проходить потік водного розчину, визначають ступінь рухомості кожного з хімічних елементів та їх сполук. Практично в усіх гсосистемах у вертикальній структурі виділяються суміжні геогоризонти, які значно відрізняються один від одного за цими умовами. Тут різко змінюються умови міграції різних речовин – одні  з них випадають з розчину і концентруються, інші мігрують менш інтенсивно і накопичуються частково, треті не реагують на зміну умов міграції. В геохімії ландшафту місця, де різка зміна умов міграції призводить до накопичення елементів, називаються *ландшафтно-геохімічними бар’єрами*(термін ввів О. І. Перельман). Залежно від параметрів, значення яких різко змінюються набар’єрі, виділяють їх різні типи. При цьому на кожному з типів бар’єрів накопичується характерна асоціація хімічних елемен­тів (табл. Б.5, додаток Б). У різних геосистемах кількість та склад ландшафт­но-геохімічних бар’єрів неоднакові. Так, у лісових геосистемах Ук­раїни переважають кислі та глейові бар’єри, степових – лужні, випаровувальні та ін.

З ландшафтно-екологічної точки зору, крім типу бар’єру, важ­ливо враховувати і його місцеположення у вертикальній структу­рі геосистеми. Так, бар’єри, розміщені в ґрунті нижче його кореневмісного шару, в екологічному плані можуть відігравати пози­тивну роль – токсичні  елементи, що тут накопичуються, рослина­ми споживатися не можуть, і водночас цей бар’єр перешкоджає досягненню токсичними елементами ґрунтових вод, лімітуючи їх забруднення. Такий бар’єр виконує функцію консерватора («кла­довища») забруднень у геосистемі. Натомість бар’єри, розташо­вані у межах кореневмісного шару ґрунту, можуть бути вкрай не­безпечними для рослин.

Напрямок гідрогенних потоків речовин у геосистемі відпові­дає напрямку потоку вологи. При переважанні низхідних потоків води речовини можуть виноситися за межі ґрунту і досягати рів­ня ґрунтових вод. Внаслідок цього розсолюються ґрунти, підви­щується мінералізація ґрунтових вод, а при інтенсивних потоках вологи в піщаних ґрунтах зростає дефіцит поживних речовин. Про­те частіше хімічні елементи накопичуються на бар’єрах у педогеогоризонтах та в зоні аерації. При висхідних потоках води вна­слідок фізичного випаровування ґрунтових вод вміст солей у ґрунті та підґрунті зростає, що призводить до засолення геосистем.

Важливим фактором міграції речовин у геосистемі є життєді­яльність рослин. Встановлено, що практично всі хімічні елементи, що містяться в географічній оболонці, необхідні рослинам і спо­живаються ними. З них незамінні лише деякі: N, P, K, S, Ca, Mg (макроелементи – споживаються  у великих кількостях) та Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, В та СІ (мікроелементи – споживаються  у мен­ших кількостях).

З атмосфери надземні органи рослин засвоюють мінеральні ре­човини в дуже незначних кількостях, а основна їх маса поглинається з ґрунту. Корінь здобуває мінеральні речовини шляхом: по­глинання іонів з ґрунтового розчину; обмінного поглинання сорбованих іонів (віддає іони Н+ та НСО3–, а замість них отримує іони поживних солей); розчинення зв’язаних запасів мінеральних речовин (виділяючи органічні кислоти, корінь вивільняє з хімічно зв’язаного стану елементи, зокрема важкі метали, і потім легко поглинає їх). Потрапивши до кореня, іони переносяться до інших органів рослин. Це перенесення потребує витрат енергії, джере­лом якої є дихання рослин, тому інтенсивність поглинання ними мінеральних речовин визначається едафічними факторами дихан­ня (оптимальним температурним режимом, освітленістю, співвід­ношенням між вологістю та аерацією ґрунту тощо).

Фітоценозом протягом року поглинається значна маса міне­ральних речовин (табл. Б.6, додаток Б). З неї частина F залишається в річно­му прирості фітомаси (для широколистих лісів ця величина ста­новить 70-120 кг/га), частина Fz разом з фітомасою, що поїда­ється первинними консументами, переходить до наступного тро­фічного рівня і далі мігрує по трофічній сітці аналогічно потокам енергії (див. розд. 9.1). Частина мінеральних елементів з фітоценозу надходить до атмосфери внаслідок транспірації Т з хімічними виділеннями рослин (фітонцидами) Ph та з пилком К. З дослі­джень, проведених біля Валдайського озера, відомо, що ліс південної тайги за рік перекачує в атмосферу близько 8 т/км2 речо­вин, при цьому з пилком – 04,7 т/км2.

Більша частина мінеральних речовин, накопичена фітоценозом протягом року, повертається до ґрунту з річним опадом Z. Ця кількість може становити 80-90 % річної маси накопичених рос­линами речовин. Завдяки цьому рослинність виконує в геосистемі важливу роль у замиканні потоків мінеральних речовин (їх ор­ганізації у круговорот). Це дає змогу геосистемі неодноразово протягом року використовувати мінеральні речовини в продуційному процесі та утримувати їх від вимивання в корененедосяжні педогеогоризонти.

**Антропічні аспекти. Забруднення та самоочищення геосистем**. З розрахунків мас хімічних елементів, які щорічно залучаються до техногенних потоків, відомо, що з 60-х років ХХ ст. геохімічна діяль­ність людини за потужністю не поступається природним проце­сам. За рахунок цієї діяльності поверхня суші щорічно збагачу­ється на мільйони тонн Р, Ті, Cu, Mn, Zn, Pb та інших елементів, на десятки тисяч тонн Rb, H, Zr. Основні джерела надходження забруднень до геосистем – атмосфера, внесення добрив та оброб­ка агрогеосистем пестицидами та отрутохімікатами, забруднені підземні води, захоронені в ґрунті та породах зони аерації тех­ногенні речовини, зрошення стічними та забрудненими річковими водами.

Потрапляючи до атмосфери, забруднюючі речовини (це 90 % газів і 10 % твердих частинок) досить швидко розсіюються. Середня тривалість знаходження газів у тропо­сфері становить 2-4 місяці, аерозолів – 4  місяці біля тропосфе­ри,   1 місяць у верхній та 6-10 діб у нижній тропосфері. Ці дані слід розглядати як орієнтовні, оскільки тривалість перебування викидів в атмосферу визначається багатьма метеорологічними умовами, які дуже мінливі в просторі й часі. Атмосферні забруд­нення можуть проникати в рослини внаслідок їх газообміну, оса­ду на поверхні листя та пагонах. При тривалій дії навіть неви­соких концентрацій забруднень у рослин виникають хронічні по­шкодження (депресія фотосинтезу, порушення росту, відмирання клітин тощо). Різні рослини неоднаково реагують на атмосферні забруднення. Найбільш чутливі до них лишайники, з дерев – яли­на  (до дії HF, SO2, HC1), сосна (до HF, NH3 SO2), горіх (HF, NH3), береза (ПСІ). Стійкими вважаються туя, деякі види дубів, кленів, граб.

Чутливість рослин до атмосферних забруднень залежить від едафічних факторів. Встановлено такі основні закономірності: *температура* – з  її підвищенням чутливість рослин дещо зростає; *вологість повітря* – в  діапазоні 30-60% чутливість рослин зрос­тає слабо, понад 60% – різко; *вологість ґрунту –*чим  вологі­ший ґрунт, тим чутливість більша, проте сукулентні галофіти на цей параметр практично не реагують; *наявність поживних елемен­тів у ґрунті* – рослинність  бідних, особливо піщаних ґрунтів чут­лива до атмосферних забруднень, чим вищий у ґрунті вміст N, Р, К та СаСО3, тим чутливість менша; при нестачі в ґрунті пев­ного елемента стійкість рослин до атмосферного забруднення менша.

Потрапляючи на поверхню ґрунту, забруднюючі речовини включаються у вертикальні потоки і при цьому можуть значно трансформувати їх налагоджений механізм. Це пов’язано з тим, що багато забруднюючих речовин здатні руйну­вати деякі важливі ландшафтно-гео­хімічні бар’єри, створювати нові, змі­нювати тип тих, які були раніше, вна­слідок зміни кислотно-лужних або окиснювально-відновних влас­тивостей ґрунту змінювати і швидкість міграції різних речовин. Проходячи крізь ґрунт, забруднені води можуть частково або й повністю очищуватись, проте сам ґрунт при цьому забрудню­ється. Хімізм цього забруднення та вертикальний розподіл акумульованих речовин залежить від типу ландшафт­но-геохімічних бар’єрів та їх місце­положення в геосистемі (див. табл. Б.5, додаток Б).

Будь-яку забруднюючу речовину, що потрапила до ґрунту, мо­жуть поглинати живі організми. З рослин-автотрофів, які акуму­люють забруднюючі речовини, починається забруднення всієї трофічної сітки геосистеми.   На­копичення токсичних речовин у живих організмах збільшується з кожним наступним трофічним рівнем (додаток А, рис. А.13). Тому навіть незначна концентрація забруднюючих речовин у рослинах може викликати токсикацію тварин вищих трофічних рівнів.

Завдяки живим організмам забруднення залучається до кру­говороту мінеральних речовин, і виведення їх з геосистеми уск­ладнюється. Однак геосистеми мають певні механізми, що дозво­ляють їм знешкодити забруднення або вивести їх з круговороту та з геосистеми взагалі. Сукупність цих механізмів називається *самоочищенням геосистем.*

Самоочищення геосистем може реалізовуватись у трьох гру­пах процесів: винесення забруднень за межі геосистем ґрунтовими водами, вітром та з урожаєм; зв’язуванням забруднень у важкодоступні (зокрема нерозчинні) форми, так що їх споживання жи­вими організмами стає практично неможливим; розкладання токсич­них речовин на сполуки та елементи, які не є небезпечними для живих організмів.

      Як умовну форму самоочищення геосистеми можна також вважати концентрацію забруднень на ландшафтно-геохімічних бар’єрах, які розташовані між ґрунтовим профілем та капілярною каймою ґрунтових вод (у так званому «мертвому горизонті»). Тут забруднюючі речовини можуть накопичуватися в легкорозчинній формі і в значних кількостях, але при цьому вони нешкідливі ні для рослин, ні для ґрунтових вод. Для коре­нів рослин забруднюючі речовини недосяжні, а проникнення їх до ґрунтових вод блокується ландшафтно-геохімічним бар’єром та (або) непромивним водним режимом геосистеми.

**Типологія.**Оскільки міграція мінеральних речовин визнача­ється багатьма факторами і призводить до різноманітних наслід­ків, типізувати геосистеми за особливостями речовинних потоків можна за багатьма ознаками.

*За хімічним складом*особливе значення має типологія геосис­тем за елементами, які мають високий вміст (кларк) у геосистемі та енергійно мігрують і накопичуються в ній, визначаючи умови міграції й інших речовин. У геохімії ландшафту такі елементи на­зиваються типоморфними і до них належать Н, Fe, Al, Ca, Na, Mg, НСОз, SО4, H2 S, СІ та ін. За переважаючою роллю певного типоморфного елемента або їх групи виділяються відповідні типи геосистем, наприклад: кислі (Н), кислі глейові (Н-Fe) – поши­рені   у хвойних лісах; кальцієві (Са), кальцій-натрієві (Са-Na) – в степах; натрієві (Na), хлоридно-натрієві (СІ-Na) – в геосистемах степових западин та подів із солончаками тощо.

Запропонована класифіка­ція круговоротів зольних елементів та азоту, в якій враховано пе­реважаючі елементи, що залучаються в круговорот, інтенсивність цього обороту (визначається відношенням щорічного опаду до всієї його маси), продуктивність та зональний тип екосистем, золь­ність рослин.

 З*а типом круговороту мінеральних елементів*можна розділити на: азотні низькозольні застійні (розвинуті в тундрі); кальцієво-азотні середньозольні сильно загальмованого обороту (поширені у хвойних та дрібнолис­тих лісах); азотно-кальцієві середньозольні загальмованого оборо­ту (широколисті ліси); азотно-кремнієві середньозольні інтенсив­ного обороту (степи); натрієво-хлоридні дуже високозольні дуже інтенсивного обороту (солончаки) та інші типи, включаючи й такі, що враховують токсичні техногенні елементи, залучені до круго­вороту (наприклад, Sr-90 в соснових лісах біля Чорнобилю).

Потоки та акумуляція мінеральних речовин у геосистемах ба­гато в чому визначаються ландшафтно-геохімічними бар’єрами, тому інформативною буде типологія геосистем за *складом та міс­цеположенням ландшафтно-геохімічних бар’єрів*у їх вертикальній структурі. За цими критеріями виділяються такі типи геосистем: безбар’єрні; фітобар’єрні (лісові геосистеми з високим індексом листяної поверхні); ризо-педобар’єрні (геосистеми, ландшафтно-геохімічні бар’єри яких містяться в межах кореневмісного шару ґрунту); педобар’єрні (бар’єри знаходяться у ґрунті нижче кореневої системи);  літобар’єрні; комплексно-бар’єрні (наприклад, фіторизобар’єрні, педо-літобар’єрні тощо).

Більшість геосистем належать до комплексно-бар’єрного типу.

Е к о б і о ц е н т р и ч н а   т и п о л о г і я. Продуктивність та ви­довий склад рослинних угрупувань значною мірою визначаються вмістом у ґрунті поживних речовин (N, Р, К та мікроелементів), тому багатство місцезростання  можна вважати одним з головних кри­теріїв класифікації екотопів. З ландшафтно-екологічного погляду найбільш відповідною можна вважати типологію умов місцезрос­тань *за багатством ґрунту елементами живлення*. Виділяються такі геосистеми: оліготрофні (вкрай бідні на солі – 34-80 мг/л), семіоліготрофні (солей ду­же мало – 75-82 мг/л), субмезотрофні (80-120), мезотрофні (по­рівняно насичені солями –        100-150), субевтрофні (добра забезпе­ченість солями –       150-200), евтрофні (найбільша забезпеченість со­лями за відсутності ознак засолення ґрунтів), пертрофні (забез­печеність солями більша за оптимум, але ще не пригнічує росту рослин).

За *ступенем засоленості ґрунтів*є такі геосистеми: глікофітні (слабкосолонцюваті ґрунти, ознаки пригнічення рослин невираз­ні), семігалофітні (глибокозасолені, середньосолонцюваті ґрунти), субгалофітні (середньо- та сильносолонцюваті засолені ґрунти), галофітні (солонці та поверхнево засолені ґрунти), супергалофітні (солончаки).