

Лекція 5-7

Джерела екологічної небезпеки підземної гідросфери

Усі процеси в біосфері тісно пов'язані між собою, тому екологічний стан гідросфери безпосередньо залежить від стану атмосфери і літосфери. Забруднювальні речовини атмосфери і літосфери врешті-решт потрапляють у воду, й отже, впливають на всі живі організми, які не можуть існувати без неї [37].

Вплив атмосфери. Склад атмосферних опадів залежить від стану атмосфери. Одна крапля дощу масою 50 мг, що падає з висоти 1 км, омиває 16 л повітря. Отже, 1 л дощової води контактує з $3,2 \cdot 10^5$ л повітря. Звідси випливає, що забруднювальні речовини легко вимиватимуться з повітря. Прикладом цього є кислотні дощі. Вода, що утворилась унаслідок конденсації водяної пари, є нейтральною (рН 7). Проте навіть у найчистішому повітрі міститься вуглекислий газ. Дощова вода розчиняє його і підкислюється до рН 5,6-5,7. Унаслідок розчинення оксидів сірки й азоту рівень рН дощової води знижується ще більше.

Вплив літосфери. У процесі колообігу природна вода контактує з різними мінералами, розчиняє значну кількість гідрофільних інгредієнтів, до яких належать вісім основних іонів: хлориди, сульфати, гідрокарбонати, карбонати, натрій, калій, магній, гідроген. Відомо, що без мікро- та макроелементів життя неможливе. Однак, з іншого боку, між твердістю води і захворюваннями серцево-судинної системи існує зворотна кореляція.

Нафтопереробна промисловість. Стічні води нафтопереробних підприємств зазвичай містять нафту, нафтопродукти, феноли, сполуки сірки тощо.

Підприємства хімічної промисловості. Головними забруднювачами є синтетичні поверхнево-активні сполуки (детергенти), що входять до складу стічних вод. Вони ускладнюють роботу очисних споруд водовідведення, викликають піноутворення, що спричинює винесення активного мулу зі споруд біологічного очищення. Деякі сполуки зменшують вміст розчиненого у воді кисню, інгібують метаболічні процеси в активному мулі.

Машинобудівні підприємства. У стічних водах цих підприємств зазвичай містяться нерозчинні мінеральні речовини, нафтопродукти, хром, цинк, мідь, свинець, ціаніди, феноли, масла.

Сільське господарство. Активне ведення сільського господарства пов'язане з використанням мінеральних та органічних добрив, скиданням недостатньо очищених стічних вод ферм, свинарників, пташників у поверхневі водойми. Наприклад, комплекс для відгодівлі 10 тис. голів худоби дає таку ж кількість стічних вод, як і місто з населенням 100 тис. осіб.

Підприємства харчової промисловості. Стічні води винних і дріжджових заводів, молокозаводів, кондитерських фабрик тощо містять значну кількість біогенних елементів. Недостатнє очищення таких вод призводить до евтрофікації (збагачення біогенними елементами) водойм.

Дія підземної гідросфери на людину

Вода у житті людини відіграє надзвичайно важливу роль. Життя зародилося у воді, і саме вона є основою внутрішнього середовища тваринних і рослинних організмів. Проте вода в організмі міститься не лише в рідинах. Наприклад, кістки скелета містять 22 %, печінка - 70, а сіра речовина мозку - 86 % води. З віком кількість води в організмі зменшується.

Вода - найважливіший компонент усіх клітин, основа міжклітинної рідини, плазми і лімфи; її маса становить близько 65-70 % маси тіла людини. У клітинах вода є розчинником неорганічних та органічних сполук, бере участь у багатьох хімічних реакціях, що відбуваються у водних розчинах. Щодоби організм людини втрачає велику кількість води із сечею, потом і повітрям, що видихається. Тому людина поповнює її запаси напоями і їжею. Деяка кількість води утворюється внаслідок розщеплення речовин їжі (насамперед жирів). Добова потреба людини у воді - 2,5-3,0 л, проте залежно від умов зовнішнього середовища вона може змінюватись.

Шляхи впливу. Організм людини контактує зі складовими гідросфери через верхні дихальні шляхи, шлунково-кишковий тракт і шкіру.

Верхні дихальні шляхи - найменш вивчені. Механізм їх дії полягає в тому, що в насиченому водяною парою повітрі (туман, смог) у найдрібніших краплях води розчиняються різні токсичні домішки і гази. Альвеоли легенів мають величезну всмоктувальну поверхню, тому шкідливі домішки впливають насамперед на цей орган і зумовлюють його патологію. Через велике коло кровообігу вони потрапляють всередину організму. При цьому обминається найпотужніший фільтр людського організму, де відбувається детоксикація ксенобіотиків - печінка.

Шлунково-кишковий тракт. Значна частина води, що надходить в організм у вільному стані, всмоктується в дванадцятипалій кишці, порожній кишці та шлунку. За незадовільної якості води у джерелах водопостачання насамперед уражується шлунково-кишковий тракт, що спричинює розвиток гастроентеритів.

Шкірні покриви. Під час купання шкіра людини тісно контактує з водою, тому в екологічно неблагополучних водоймах в організм людини можуть потрапити найпростіші, бактерії, гельмінти і комахи, які живуть і розмножуються у водному середовищі, та спричинити інфікування.

Згідно з класифікацією ВООЗ, існує п'ять груп захворювань, пов'язаних з екологічним станом гідросфери:

від зараженої води (тиф, холера, дизентерія, поліомієліт, гепатит);

- шкіри та слизових оболонок (трахома, проказа); викликані моллюсками (шистосомоз, ришта);
- спричинені комахами, які живуть і розмножуються у воді (малярія, жовта лихоманка);
- від забрудненої води.

За даними Світового банку, близько 1,2 млрд людей у світі споживають екологічно неблагополучну воду. З її екологічним неблагополуччям пов'язують багато захворювань людини. Розглянемо докладно, які основні компоненти можуть міститися в питній воді, яку патологію вони можуть викликати та яких заходів слід вжити для зменшення їх негативного впливу.

2.7.1. Неорганічні контамінанти

Нітрати. Ці забруднювальні сполуки потрапляють у питну воду переважно внаслідок інтенсивного застосування в сільському господарстві азотних та органічних добрив.

Свинець. Найвний у воді свинець має антропогенне походження.

Питна вода в Європі містить у середньому 0,03 мг/дм³ свинцю [47]. Надмір свинцю виявляється у кістковій тканині й крові матерів. Близько 8% свинцю, що надходить в організм, всмоктується у шлунково-кишковому тракті. Організм дитини здатний резорбувати близько половини цього елемента, після чого він з'єднується з гемоглобіном крові і швидко розноситься по всьому організму. Середній вміст свинцю в тілі жителів європейських країн: у крові - 0,3 мкг/мл, сечі - 0,03 мкг/мл, тканині мозку - 0,1 мг/кг, нирках - 0,8, печінці - 1,0, кістковій тканині - до 20 мг/кг.

У кістковій тканині й зубах він утворює важкорозчинну сполуку фосфат свинцю. Біологічний період напіввиведення цього елемента з кісток становить 30 років, у зв'язку з цим у кістках сучасної людини його в 700-1200 разів більше, ніж у людини, яка жила 1600 років тому.

З організму свинець виводиться переважно через нирки (75 %) і шлунково-кишковий тракт (15 %). У волоссі, нігтях може накопичуватись до 10 % наявного в організмі свинцю.

За хронічного впливу цей елемент пошкоджує гематопоетичну систему. Він знижує активність ферменту 8-амінолевулінаде-гідратази (8-АЛДази), яка перетворює 8-амінолевулінову кислоту (8-АЛК) на порфобіліноген (рис. 2.18). Концентрація 8-АЛК у крові й відповідно в сечі підвищується (важливий діагностичний параметр!) і досягає 0,3 мкг 8-АЛК/мл сечі, що свідчить про інтоксикацію свинцем. Сповільнення дії інших ферментів - корпогенази і ферохелатази - призводить до збільшення в сечі концентрації корпорпорфіриногену III (речовина-барвник коричневого кольору, що надає шкірі субіктеричного забарвлення) і прото-порфірину в еритроцитах. Інгібування процесу включення в гемоглобін заліза призводить до гіпохромної анемії.

Ранніми специфічними й об'єктивними ознаками хронічного сатурнізму (підвищеного вмісту в організмі свинцю) є: концентрація цього важкого металу в крові понад 0,4 мг/дм³; вміст гематопорфірину в сечі понад 0,1 мг/дм³; зниження активності 8-АЛДази в крові і збільшення вмісту 5-АЛК у сечі.

При цьому в організмі відбуваються такі послідовні зміни:

- пригнічення 5-АЛДази еритроцитів;
- підвищення вмісту протопорфірину еритроцитів; збільшення екскреції з сечею 5-амінолевулінової кислоти та корпорпорф Ірину;
- інгібування активності Na^+ - K^+ -АТФази;
- зниження рівня гемоглобіну.

Інтоксикація людей з групи підвищеного ризику може виникати за концентрації свинцю в крові 0,25-0,30 мг/дм³. Його вміст в організмі людини починає швидко збільшуватись, якщо надходження металу перевищує 0,005 мг/кг маси тіла (для дорослої людини добова доза - 0,3 мг).

Свинець небезпечний для людей різного віку, особливо для дітей та вагітних жінок. Прояви його впливу різні й залежать від концентрації в організмі (рис. 2.19). Накопичення свинцю призводить до передчасних

пологів, зменшення маси тіла дитини при народженні, гальмування її розумового і фізичного розвитку.

У механізмі токсичної дії свинцю значну роль відіграє лактат свинцю, що утворюється в м'язах у результаті взаємодії свинцю з молочною кислотою. Ця сполука легко проникає в нервові та м'язові клітини, реагує з фосфатами з утворенням важкорозчинного фосфату свинцю, який формує на оболонці клітин бар'єр, що заважає нормальному проникненню в клітини йонів кальцію. Наслідком подібної блокади є нейром'язові ефекти (парези, паралічі), що спостерігаються за свинцевої інтоксикації. Найчутливіші до впливу свинцю тканини, що швидко ростуть, та ембріональні клітини.

Свинець здатний також долати плацентарний бар'єр (особливо з 12-го тижня вагітності), що призводить до психічних розладів і розумової відсталості майбутніх дітей. Отже, особами підвищеного ризику щодо дії свинцю є немовлята, діти, вагітні жінки, люди із захворюваннями нирок та хворі на анемію.

Навіть за безпечного рівня свинцю в крові (10 мкг%) він може викликати неврологічну симптоматику, зміну поведінкових симптомів, зокрема дратівливість, погіршення уваги.

Тривала дія свинцю може призвести до м'язової слабкості, гіперактивності й навіть агресивності дітей. У дорослих свинець стимулює гіпертонію, погіршує слух.

Хронічна інтоксикація свинцем розвивається повільно. На ранніх етапах може лише знижуватись адаптаційна здатність організму та його стійкість до дії токсичних, інфекційних, онкогенних, інших патогенних агентів. Потім розвиваються загальна слабкість, головний біль, запаморочення, неприємний смак у роті, тремор кінцівок, втрата апетиту, зменшення маси тіла, ознаки анемії, запори, біль у животі. Можливі дифузна дегенерація міокарда, порушення психічного розвитку дітей, хронічна нефропатія. Висловлено гіпотезу щодо мутагенної й канцерогенної дії свинцю, але вона потребує підтвердження. Свинець виявляє свій мутагенний потенціал за комбінованої дії з іншими металами (синергізм).

За даними епідеміологічних досліджень, існує пряма кореляція між концентрацією свинцю в питній воді (понад 0,8 мг/дм³) і частотою психічної відсталості дітей, а також смертністю від раку нирок та всіх видів лейкемії. Певна залежність є і між забрудненням ґрунту чи повітря свинцем та його кількістю в організмі людини [47]. Так, за збільшення вмісту свинцю в ґрунті

урбанізованих територій на кожні 1000 мг/кг його вміст у крові людини зростає на 10 мкг%. За підвищення концентрації свинцю в повітрі на 1 мкг/м³ його концентрація в крові дорослих людей збільшується на 1,8, дітей - на 4,2 мкг%. Допустимий вміст цього елемента в крові - 10 мкг%.

Відомо два шляхи надходження свинцю в питну воду: через забруднення ним ґрунту; з арматури водопровідної мережі.

Основним джерелом забруднення ґрунту свинцем є викидні гази автомобілів, в яких як паливо використовують етильований бензин. Потрапивши на поверхню ґрунту, свинець змивається дощовими і талими водами, інфільтрується в ґрунт, досягає водоносних горизонтів і надходить у системи децентралізованого й централізованого водопостачання. Особливо небезпечними є поверхневі водні об'єкти, які дедалі частіше використовують як джерела водопостачання великих міст.

Свинець також вимивається із сантехнічної арматури, виготовленої з латуні. Латунь - сплав міді з цинком (до 50 %) та домішками інших елементів (свинцю, алюмінію, олова, заліза, нікелю, мангану - до 10 %). Переходу свинцю у воду сприяють кисла реакція води та її низька твердість. Основними способами зменшення вмісту свинцю в питній воді є:

- для пиття і приготування їжі слід брати тільки холодну воду, оскільки гаряча краще вимиває свинець з деталей сантехнічної арматури;
- перед набиранням води з водопровідного крана вона має стекти протягом кількох хвилин, особливо якщо її не брали протягом кількох годин; при цьому свинець, що вже перейшов у воду з деталей сантехнічної арматури, змиється;
- найефективніший спосіб - використання фільтрів з активованим вугіллям, які зменшують концентрацію свинцю у фільтраті на 88-90 %.

Барій. Акумулюється в печінці, легенях і селезінці. Пролонгує процес стимуляції скорочення м'язів, блокує передачу нервових імпульсів, чим викликає захворювання нервової системи, системи кровообігу.

Кадмій. У середньому в організм людини надходить близько 10 нг кадмію за добу. В шлунково-кишковому тракті резорбується до 5 % цього металу. Після всмоктування він у крові зв'язується переважно з альбуміном і надходить у печінку й нирки, де активується синтез металозв'язувального протеїну (металотіонеїну). Потрапивши в тубусні клітини, він відщеплюється з комплексу металотіонеїн-кадмій. Незв'язана форма кадмію є токсичним компонентом, який за концентрації понад 200 мг/кг призводить до ураження нирок. Металотіонеїн - термостабільний білок з молекулярною масою 5-6

кДа. Характерна його особливість - відсутність у первинній структурі залишків ароматичних амінокислот і наявність до 20 вільних 8Н-груп амінокислоти цистеїну, які поділяють на два зв'язувальні кластери (СМ3 і СМ4). Функцією метал отіонеїну вважають зв'язування і перенесення важливих мікроелементів (Си, 2п), а також зв'язування важких металів (Н§, Ссі).

Біологічний період напіввиведення кадмію з печінки і м'язової тканини становить 10-35 років. В організмі людей, які палять, міститься у 3-4 рази більше кадмію.

Накопичення кадмію в організмі супроводжується дегенеративними змінами слизових оболонок носа, глотки, руйнуванням нюхового епітелію, обструктивними захворюваннями верхніх дихальних шляхів, тяжким ураженням нирок. Інтоксикація кадмієм супроводжувалася тяжкою остеомалаяцією, остеопорозом, залізодефіцитною анемією (хвороба ітай-ітай), а також деформацією скелета через порушення обміну фосфату і вітаміну Б₃.

Механізм впливу кадмію на обмін кальцію в організмі людини ілюструє рис. 2.20. У печінці з вітаміну Б₃ синтезується 25-гідрокси-0₃ (25-ОН-холекальциферол, 25-ОН-0₃). У тубусних клітинах нирок 25-ОН-0₃ перетворюється на активний метаболіт вітаміну Б₃ - 1,25-дигідрокси-0₃ (1,25-[ОН]₂-холікальцифе-рол, 1,25-[ОН]₂-Б₃), який активує вивільнення Са²⁺ з кісток, стимулює резорбцію Са²⁺ з тонкої кишки у плазму. Кадмій пригнічує обидва ці механізми. Крім того, він гальмує захоплення Са²⁺ в тубусних клітинах нирок, інактивує в них фермент аденілатцик-лазу.

Накопичення кадмію в організмі може бути пов'язане з нирковою артеріальною гіпертензією, мутагенним (але не канцерогенним) ефектом.

Арсен. Застосовується у фармацевтичній промисловості (виробництво лікарських засобів для лікування сифілісу, псоріазу), мікроелектронній промисловості (виготовлення напівпровідників з арсенідів галію, індію), у виробництві біоцидів, пестицидів, гербіцидів, засобів захисту деревини тощо. В організм людини надходить переважно з питною водою, яка може містити його до 40 мкг/дм³. Небезпека потрапляння з продуктами харчування значно менша. Вплив арсену залежить від валентності металу (тривалентний арсен значно токсичніший за п'ятивалентний). Механізм дії арсену полягає у блокуванні сульфгідрильних груп ліпоєвої кислоти, наприклад у піруватдегідрогеназному комплексі (рис. 2.21), що призводить до його інгібування. Детоксикація арсену пов'язана з метилуванням його

тривалентної форми до диметиларсинової або монометиларсинової кислоти (рис. 2.22), а також з окисненням до $\text{As}(\text{V})$, який виводиться з сечею. В дитячому організмі реакції метилування арсену відбуваються набагато швидше, ніж у дорослому.

Хронічний вплив арсену спричинює втрату маси тіла, депресії, розвиток онкологічних захворювань.

Хром. Хімічний елемент, необхідний для підтримання життєдіяльності. За надмірного надходження чинить токсичну дію. Акумулюється в нирках, селезінці, кістковій тканині, печінці, головному мозку. Виявляє канцерогенний ефект, викликає ураження нирок.

Мідь. Входить до складу сплаву латуні сантехнічної арматури, звідки потрапляє в питну воду. Питна вода в країнах Європи містить у середньому до $0,01 \text{ мг/дм}^3$ міді (допустимий її вміст у країнах Євросоюзу - $0,1 \text{ мг/дм}^3$).

Мідь - складова частина багатьох металоензимів, зокрема цитохромоксидази, 2п-Си-залежної супероксиддисмутази, тиро-зинази тощо.

Надмірна кількість міді спричинює характерні захворювання людини. Вона всмоктується у шлунково-кишковому тракті (40 %), у тім числі в шлунку - 15 %. Після резорбції мідь з'єднується переважно з альбуміном крові, транспортується в печінку, де утворює комплексну сполуку з металотіонеїном, надходить у церулоплазмін, з яким розподіляється по тканинах організму. Середній вміст міді в організмі людини: у плазмі - $0,13 \text{ мкг/мл}$, нирках - 2 мг/кг , серцевому м'язі - 3, тканині печінки - 5, тканині мозку - 6 мг/кг . Вміст міді в печінці та селезінці малих дітей у 3—4- рази більший, ніж у дорослих.

Протягом 72 год через нирки виводиться лише близько 1 % міді, що надійшла в організм, із фекаліями - близько 10, з потом - до 3 %.

За хронічного впливу міді у дітей порушується функція печінки, ослаблюється імунна система. Крім того, вона подразнює шлунково-кишковий тракт, є цитотоксичним агентом, здатним індукувати гепатичний цироз.

Фтор. Фтор справляє як позитивний, так і негативний вплив на здоров'я людини. Вміст у питній воді близько 1 мг/дм^3 фтору запобігає розвитку карієсу та остеопорозу, за його концентрації понад $1,8 \text{ мг/дм}^3$ виникає флюороз (потемніння зубної емалі). У регіонах, де концентрації фтору високі як у воді, так і в харчових продуктах, випадки скелетного флюорозу і

переломи кісток - поширене явище. У разі знесолювання й обробки води за допомогою мембран та аніонообмінних смол з води видаляють практично весь фтор. Використання такої води в питних цілях, з погляду здоров'я суспільства, сильно залежить від конкретних обставин. При цьому основним завданням має бути посилення позитивного ефекту наявності фтору в питній воді (захист від карієсу) з мінімізацією небажаних проблем ротової порожнини й здоров'я в цілому.

Хлор. Широко використовують для знезараження води від бактерій, вірусів, інших мікроорганізмів. Хлоруванням води вдалося подолати такі небезпечні хвороби, як холера і тиф, що легко розповсюджуються зараженою водою. Вони вже практично не трапляються у розвинених країнах. Проте існують проблеми, пов'язані з надмірним вмістом хлору в питній воді. По-перше, це проблема її якості. За надмірного вмісту хлору вона має неприємний смак і специфічний хлорний запах. По-друге, це захворювання, що може спричинити сам хлор. Ризик виникнення раку сечового міхура та прямої кишки у людей, які споживають хлоровану воду, відповідно на 21 і 38 % більший, ніж у тих, які п'ють воду з незначним вмістом хлору. По-третє, вплив хлорзаміщених сполук метану, що утворюються в питній воді під дією хлору, навіть коли в ній містяться нешкідливі органічні сполуки, зокрема леткі. Дію хлорзаміщених сполук метану також пов'язують з ризиком виникнення онкологічних захворювань.

Концентрацію залишкового хлору після знезараження води нормують (вільного хлору - 0,3-0,5, зв'язаного - 0,8-1,2 мг/дм³). Проте відомі факти надмірного його вмісту у водопровідній воді, особливо навесні та влітку

Радон. Радіоактивний елемент, який утворюється в результаті розпаду природного урану або торію. Радон потрапляє у воду з порід водоносних горизонтів (граніти, базальти, пісок). Зазвичай концентрація радону в природній воді незначна, проте у воді глибоких артезіанських свердловин його вміст може коливатися від 10⁻¹⁰ до 10⁻⁶ Кі/дм³.

Вміст радону у воді становить подвійну небезпеку для людей. По-перше, споживання води, забрудненої радоном, може призвести до злоякісних новоутворень у шлунково-кишковому тракті, нирках, а також до лейкозів. По-друге, захворювання може спричинити збільшений вміст цього елемента в повітрі приміщень, найчастіше - у ванних кімнатах. У середньому концентрація радону в повітрі ванних кімнат приблизно в 3 рази вища, ніж кухонь, і в 40 разів - ніж житлових кімнат. Результати досліджень, виконаних у Канаді, підтвердили, що концентрація радону у ванній кімнаті за 7 хв

роботи теплої душі швидко зростала (приблизно у 37 разів) і тільки протягом наступних 1,5 год поверталась до норми. Подібна ситуація є чинником збільшення ризику виникнення раку легенів у людей.

Органічні контамінанти. Леткі органічні сполуки

Леткі органічні сполуки (ЛОС) - бензол, тетрахлорид вуглецю, вінілхлорид, толуол, дихлоретан тощо становлять небезпеку навіть за незначного їх вмісту у воді. Методики визначення цих сполук складні і дуже дорогі [48].

Хронічне надходження в організм одного з представників ЛОС - тетрахлорбензолу (рис. 2.23) призводить до хромосомних аберацій у периферичних лімфоцитах.

Леткі органічні сполуки є побічними продуктами виробництва пестицидів, фарб, клеїв, барвників, парфумерних виробів, перегонки нафти тощо. Вони потрапляють у природні води в результаті виробничих витоків, промислових аварій, через халатність. Основний шлях їх надходження в питну воду - інфільтрація з поверхні ґрунту до водоносного горизонту. Значні кількості ЛОС виявляють у воді відкритих водойм, річок, особливо в районах індустріальних зон. У зв'язку з виснаженням підземних запасів питної води й використанням у дедалі більших масштабах води поверхневих вод ймовірність забруднення питної води зростає.

За тривалого надходження в організм людини з питною водою ЛОС можуть спричинити розвиток низки захворювань (табл. 2.2). У процесі їх знешкодження утворюються численні продукти широкого спектра дії. Трихлороксиран - продукт моноксиге-назної реакції, здатний зв'язуватись із макромолекулами, чинить токсичний вплив на печінку і нирки.

На рис. 2.24 як приклад наведено схему метаболічної трансформації одного з ЛОС - трихлоретану.

Крім того, з нього утворюються хлоральгідрат, трихлорета-нол і трихлороцтова кислота, які чинять седативну, токсичну та подразнювальну дію на центральну нервову систему. Метаболіти трихлоретану, утворені за участю глутатіону, характеризуються канцерогенною дією.

Таблиця 2.2 Захворювання, спричинювані дією летких органічних сполук

ЛОС	Захворюван	ЛОС	Захворюва
1	2	3	4
Дихлорбензо п	Ураження нирок	Тетрахлор ил	Злоякіс ні
Трихлорбенз ол	Ураження нирок	Пентахлорфен ол	Те саме
Дихлоретан	Ураження нирок, печінки, нервової	Вінілхлорид	« »
Трихлорета н	Ураження печінки,	Дихлорметан	« »
Бензол	Злоякіс ні	Хлорзаміщ ені метану	« »
Толуол	Те саме		

Твердість питної води та її вплив на здоров'я людини

Твердість води - це сукупність властивостей води, пов'язана з наявністю в ній розчинених солей металів, переважно кальцію та магнію. Типи твердості води ілюструє рис. 2.25.

Карбонатна твердість зумовлена наявністю у воді гідрокарбонатів і карбонатів кальцію та магнію. Вона майже повністю усувається під час кип'ятіння води, тому її називають тимчасовою. Під час нагрівання води гідрокарбонати розкладаються з утворенням вугільної кислоти і випаданням в осад карбонату кальцію та гідроксиду магнію.

Некарбонатна твердість зумовлена наявністю у воді кальцієвих і магнієвих солей сильних кислот (сульфатної, нітратної, хлоридної). Під час кип'ятіння така твердість не усувається, тому її називають постійною.

Загальна твердість є сумою карбонатної (тимчасової) та не-карбонатної (постійної) твердості.

Твердість води виражають концентрацією в ній катіонів кальцію та магнію. В Україні за одиницю вимірювання твердості води прийнято моль на 1 м^3 (моль/ м^3), проте на практиці частіше використовують мілімоль на 1 дм^3 (ммоль/ дм^3). Одиниця $1 \text{ моль}/\text{м}^3$ відповідає масовій концентрації еквівалентів

йонів кальцію ($1/2 \text{Ca}^{2+}$) - 20,04 г/м³ та йонів магнію ($1/2 \text{Mg}^{2+}$) - 12,16 г/м³. Числове значення твердості, виражене в моль/м³, дорівнює числовому значенню твердості, вираженому в мг-екв/дм³. Отже, 1 моль/м³ = 1 ммоль/дм³ = 1 мг-екв/дм³.

За значенням показника твердості воду поділяють на шість класів:

- 1) дуже м'яка (0-1,5 мг-екв/дм³);
- 2) м'яка (1,5-3,0 мг-екв/дм³);
- 3) середньої твердості (3,0-4,5 мг-екв/дм³);
- 4) доволі тверда (4,5-6,0 мг-екв/дм³);
- 5) тверда (6-10 мг-екв/дм³);
- 6) дуже тверда (понад 10 мг-екв/дм³).

Тверда вода пересушує шкіру, в ній погано піняться мийні засоби, мило, пральний порошок. Тверда вода є причиною появи осаду (накипу) на стінках котлів, у трубах, на поверхнях теплообмінного обладнання тощо. Використання дуже м'якої води може призводити до корозії металевого обладнання, труб. Споживання занадто твердої чи надмірно м'якої води є небезпечним для здоров'я людини.

Твердість поверхневих вод переважно менша за твердість підземних. Твердість води поверхневих джерел істотно коливається протягом року; вона максимальна наприкінці зими і мінімальна в період паводків, коли розбавляється м'якою дощовою і талою водою. Твердість підземних вод зазвичай вища (до 80-100 мг-екв/дм³) і менше змінюється протягом року. Джерелом йонів металу в підземних водах є осадові породи, здебільшого вапняк CaCO_3 і доломіт $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Морська вода характеризується значною твердістю (Юя-ЮОи мг-екв/дм³).

Геологічні та гідрологічні умови залягання підземних вод також визначають їх твердість. Підземні води, що залягають над непроникними породами, стійкими до ерозії, запобігають їх вивітрюванню, тому хімічний склад таких вод аналогічний складу дощових, а вода є м'якою. Якщо підземні води залягають над водопроникними породами, вони фільтруються крізь них, контактують із товщею гірських порід і сприяють їх вивітрюванню. У результаті підземна вода розчиняє породи і насичується їх розчинними складовими. Така вода є твердою.

У природних гідрогеосистемах хімічний склад води безперервно змінюється і контролюється переважно геологічними чинниками. Геохімія ерозії порід визначає склад елементів, що потрапляють у воду. Підземні води є прикладом природної еволюції хімічного складу води. Дощові води натрій-

хлоридного типу, що містять CO_2 , проникають у ґрунт. У ґрунті внаслідок розкладання органічних речовин також міститься CO_2 , який розчиняється в інфільтрованій воді й утворює вугільну кислоту. У ґрунті та в ненасиченій зоні осадових порід ця слабка кислота розчиняє карбонати кальцію і магнію (кальцит, доломіт), призводить до підвищення концентрації кальцію, магнію та гідрокарбонатів у воді.

Інфільтрована вода менш насичена киснем через бактеріальне відновлення. Нижче від рівня ґрунтових вод, за відновних умов, залізо й манган стають рухливішими, а пізніше осаджуються у формі сульфідів. За наявності глинистих мінералів у водоносному горизонті внаслідок перебігу процесу йонного обміну йони кальцію у воді замінюються на йони натрію. Тип води змінюється на гідрокарбонатний натрієвий. Так підземні води природно зм'якшуються внаслідок йонного обміну. У глибших водоносних горизонтах прісні підземні води можуть змішуватись із солоними, й отже, утворюватиметься хлоридний натрієвий тип води.

Підземні води з більшою твердістю формуються внаслідок:

- розчинення інших мінералів водоносного горизонту, переважно доломіту та гіпсу;
- змішування прісної води із солоними підземними водами;
- обводнення і змішування з морською водою;
- забруднення.

Вплив твердості води на здоров'я людини вивчало багато науковців. Так, починаючи з 1957 р. японський агрохімік Юн Коба-ясі упродовж багатьох років досліджував природу води для зрошування. Він встановив тісний взаємозв'язок між хімічним складом річкових вод, які використовували для питних потреб, та рівнем смертності від апоплексії (серцево-судинні захворювання -ССЗ), що в Японії був надзвичайно високим і став головною причиною смертності в країні. Учений з'ясував, що саме співвідношення сульфатів і карбонатів ($80_4^{27}\text{CO}_3^{2-}$) впливає на цей показник. Він вважав, що виникнення ССЗ пов'язане з твердістю води [49].

У 1960 р. вчений Шродер репрезентував результати досліджень, проведених у 163 найбільших містах США, за результатами яких довів зворотну кореляцію між твердістю води та рівнем серцево-судинних захворювань чоловіків і жінок, дослідив зв'язок між різними компонентами води і коронарною хворобою серця (КХС) у чоловіків віком 45-64 роки, встановив важливі співвідношення між рівнем смертності від КХС та

вмістом сульфатів і гідрокарбонатів у воді, а також від'ємні кореляції між смертністю від КХС та вмістом магнію, кальцію, фтору та рН води [50].

Пізніше були представлені результати досліджень зв'язку між твердістю води та рівнем ССЗ. Головною метою їх було з'ясування питання, чи чинить м'яка вода негативний вплив на здоров'я людини та чи виконує тверда вода захисні функції. М'яка вода характеризується значною корозійною здатністю, у зв'язку з чим у питну воду потрапляє більша кількість токсичних мікроелементів. Припускали, що саме це є причиною високого рівня смертності. Проте результати попередніх досліджень не підтвердили цієї гіпотези [51]. Так, у загальнонаціональному дослідженні у понад 500 проб водопровідної води відібраної в Канаді, не виявлено важливих зв'язків між смертністю та вмістом у воді таких мікроелементів, як мідь, кадмій, кобальт, літій, ртуть, молібден, нікель, ванадій [52].

Проте навіть після отримання цих результатів, роль магнію та кальцію у виникненні ССЗ остаточно не була з'ясована: більшість результатів підтверджували зв'язок між смертністю від ССЗ та вмістом кальцію і магнію у питній воді, але деякі - заперечували. Діагнози хвороб іноді були встановлені неточно. З окремих досліджень також незрозуміло, чи були концентрації кальцію і магнію в питній воді достатніми для проведення відповідних аналізів.

Одним із найгрунтовніших комплексних досліджень щодо географічних варіацій смертності від ССЗ стали їх регіональні дослідження у Великій Британії. На першому етапі (1969-1973) було застосовано багатофакторний регресійний аналіз щодо географічної варіації ССЗ у чоловіків і жінок віком 35-74 роки, які проживали в 253 містах Англії, Уельсу та Шотландії. Результати вказали на нелінійний вплив твердості води: більший у діапазоні від дуже м'якої води до середньої твердості, ніж від води середньої твердості до дуже твердої. Середньгеометричні стандартизовані показники смертності від ССЗ для населення міст були згруповані (за допомогою коваріації) за твердістю води відповідно до чотирьох кліматичних і соціально-економічних чинників (відсоток дощових днів, середньодобова максимальна температура, відсоток робітників фізичної праці, наявність власного авто), так і без них. Показник смертності стабільно зменшувався в разі споживання води твердістю 10-170 мг/дм³ СаСО₃ та дещо змінювався в діапазоні 170-290 мг/дм³ СаСО₃ і більше. Серцево-судинні захворювання у мешканців міст, які споживали дуже м'яку воду (близько 25 мг/дм³ СаСО₃), траплялися на 10-15 % частіше, ніж у людей, які споживали воду середньої твердості (близько 170

мг/дм³ CaCO₃). За споживання води твердістю понад 170 мг/дм³ CaCO₃ рівень смертності від ССЗ не зменшився. Отже, з'ясовано, що максимальна ураженість ССЗ спостерігається за споживання населенням води в діапазоні між дуже м'якою та водою середньої твердості [53].

Кілька досліджень було проведено в країнах, що розвиваються. Виявлено від'ємну кореляцію між твердістю води та різними формами серцево-судинних захворювань і лейкемії населення Шрі-Ланки [54]. Більш сучасні дослідження висвітлили проблему високого вмісту фтору та пов'язаного з цим флюорозу зубів мешканців у районах з твердою водою, видобутою з тріщинуватого водоносного горизонту підстиляючих порід у Шрі-Ланці [55, 56].

Вплив вмісту магнію у питній воді на здоров'я людини

У другій половині ХХ століття в Фінляндії були проведені дослідження з порівняння рівнів смертності людей від ішемічної хвороби серця у двох сільських населених пунктах у західній та східній частинах країни. Вибірка населення складалася з чоловіків віком 40-59 років у 1959 р. За станом їх здоров'я стежили упродовж наступних 15 років. Показники якості води визначали як середні значення в 10 населених пунктах західного регіону та в 33 - східного. Діапазон середніх концентрацій магнію у воді західного регіону становив 6,9-27,8, східного - 0,6-7,3 мг/дм³. Рівень смертності населення від ішемічної хвороби серця у східній частині Фінляндії виявився в 1,7 рази вищим, ніж у західній [57].

Через кілька років було опубліковано результати дослідження за методом випадок-контроль, проведеного в південно-східному регіоні Фінляндії [58]. Серед обстежуваних були чоловіки віком 30-64 роки, які перенесли гострий інфаркт міокарда (ті, що вилікувались, та ті, яких врятувати не вдалося), підібрані протилежно за віком та регіоном проживання; пацієнти, які лікувались у лікарні (сільська місцевість - місто) та поза її межами. Для аналізу були відібрані проби питної води, яку вони споживали. Концентрація магнію в питній воді людей, уражених інфарктом міокарда, становила 1,0-57,5, пацієнтів, які перебували в лікарні - 0,75-30,0, які лікувались в домашніх умовах - 1,0-16,0 мг/дм³. За порівняння перших та останніх відносний ризик з довірчим інтервалом 95 % становив 4,7 (95 %-й довірчий інтервал 1,3-25,3) для концентрації магнію менш як 1,2 мг/дм³. Отже, для людей, які споживали воду з найменшим вмістом магнію, ризик інфаркту

міокарда виявився майже у 5 разів більшим, ніж для тих, які споживали воду з більшим його вмістом. За порівняння перших і хворих, які знаходились під лікарняним контролем, відносний ризик становив 2,0 (95 %-й довірчий інтервал 0,7-6,5), що подвоювало ризик. Учені також встановили зворотний зв'язок між виникненням цього захворювання та концентрацією фтору у воді; зв'язку з вмістом кальцію у воді не виявлено.

Магній бере участь у життєво необхідних ензиматичних реакціях, наприклад: синтез протеїну, нуклеїнових кислот, нервово-м'язова передача, м'язове скорочення, транспортування речовин крізь мембрани клітин. Це елемент, необхідний для серцево-судинної системи, дві функції якої мають особливе значення: стабілізація серцевої електричної системи (запобігання серцевій аритмії) та регулювання судинного тону. Він незамінний для підтримання нормальної концентрації калію та кальцію в мембранах клітин, калію - всередині клітин. Процес супроводжується блокуванням спрямованого проходу калію крізь клітинну мембрану, при цьому активується ензим І_{Ca}/K-АТФ. У Са-АТФ він виконує аналогічну функцію. Більше того, магній - важливий активатор синтезу циклічного аденозинмонофосфату (АМФ), який є розширювачем судин. Якщо в організмі обмаль магнію, судинозвужувальна дія гормонів, таких як серотонін, ацетилхолін, ангіо-тензин, посилюється [59-61].

Гіпомагніємію часто виявляють у госпіталізованих пацієнтів. Ця хвороба - одна з найпоширеніших електролітичних аномалій серед пацієнтів, які потрапили до відділення інтенсивної терапії - близько 20 %. Причинами захворювання є недостатнє надходження в організм магнію, голодування, внутрішньовенне лікування без вживання додаткових доз магнію; порушення його поглинання через хронічну діарею або синдром мальабсорбції; підвищене сечовиділення, спричинене діабетом або захворюванням нирок, вживанням алкоголю, сечогінних засобів, антибіотиків [62, 63].

Найбільше магнію надходить в організм людини з продуктами харчування. Він міститься в багатьох продуктах, зокрема в горіхах, бобових, зелених листкових овочах, необроблених зернових культурах. Після обробки продуктів вміст магнію в них зменшується на 80-95 %, тому припускають, що переважна більшість людей отримує магнію менше за рекомендовану добову дозу -6 мг/(кг-доба) [64-66].

Близько 40 % магнію, що надходить в організм людини з продуктами харчування, зазвичай поглинається. Його засвоєння організмом залежить від кількості спожитих продуктів, вмісту в них інших елементів і коливається в

межах 10-70 % [67, 68]. Наприклад, за наявності кальцію, фосфору, фітинової кислоти швидкість абсорбції магнію зменшується. Більша частина магнію поглинається в тонкій кишці, переважно внаслідок пасивної дифузії трансклітинним шляхом [66, 68].

Природним джерелом магнію у воді є вивітрілі гірські породи. У вивержених породах він зазвичай входить до складу темноколірних мінералів, які містять магній і залізо - олівіну, піроксену, амфіболів, темної слюди. Магній міститься в таких мінералах гірських порід, як хлорит, монтморилоніт, серпентин, в осадових породах - магнезиті $MgCO_3$, доломіті $CaMg(CO_3)_2$. У всіх типах гірських порід магнію набагато менше, ніж кальцію, тому в більшості підземних вод його концентрація зазвичай у 5-10 разів нижча, ніж кальцію. Концентрація магнію у прісній воді контролюється реакціями його розчинення й осадження за участю магнезійних силікатів і карбонатних мінералів, як правило, вона менша за 50 мг/дм^3 , хоча зафіксовано значення понад 100 мг/дм^3 .

Споживання людиною магнію з питною водою залежить від його вмісту в ній. У зв'язку з цим постає дискусійне питання: чи є концентрація магнію у питній воді визначальною для організму людини, якщо основна частина цього елемента надходить в організм із продуктами харчування [69]? Припускають, що його вміст у воді може бути вирішальним для тих людей, які споживають його у незначних кількостях з продуктами харчування, але п'ють воду з високим вмістом магнію [70]. До того ж у разі приготування їжі на воді з низьким вмістом магнію він вимивається з продуктів, і навпаки, за високого вмісту магнію у воді його втрати в продуктах зменшуються [71]. Магній, що міститься у воді у вигляді гідратованих йонів, характеризується вищим ступенем біо-накопичення, ніж магній у продуктах харчування [70, 72].

Рослини, вирощені на територіях з високим вмістом магнію у воді та ґрунті, накопичують великі кількості цього елемента. Люди, які проживають на таких територіях і споживають продукти місцевого походження, отримують додаткову кількість магнію, особливо влітку. Проте з'ясовано, що на вміст магнію в рослинах більшою мірою впливають генетичні чинники [73].

У результаті досліджень виявлено взаємозв'язок між вмістом магнію у воді та серцевому м'язі [62], у скелетному м'язі та в коронарних артеріях [74].

Було проведено такий тест: 10 особам, які зазвичай споживали воду з концентрацією магнію $1,6 \text{ мг/дм}^3$, упродовж шести тижнів давали воду з його вмістом 20 мг/дм^3 . Після закінчення експерименту виділення магнію з організму досліджуваних збільшилось, що вказало на насичення ним організму [75].

Вплив вмісту кальцію у питній воді на здоров'я людини

Дефіцит кальцію поширений переважно серед літніх людей, особливо жінок. Засвоєння кальцію організмом людини з продуктів харчування коливається в межах 15-75 %, у жінок клімактеричного віку його поглинається лише 20-30 %. Рекомендована добова доза кальцію для населення Швеції становить 800 мг для жінок і 600 мг - для чоловіків, у США - 1000-1500 мг для дорослих [63, 76, 77].

Результати досліджень, в яких взяла участь 61 тис. жінок Швеції віком 40-76 років, підтвердили, що ефективність засвоєння організмом кальцію з віком зменшується, а також те, що в більшості жінок клімактеричного віку зафіксовано дефіцит кальцію. Аналогічні результати отримано у США, які засвідчили недостатнє споживання цього елемента, особливо жінками. Для окремих осіб із дефіцитом кальцію важливим є надходження додаткової кількості кальцію з питною водою. Крім споживання води, збагаченої кальцієм, на ній рекомендовано також готувати їжу, внаслідок чого вміст кальцію в ній підвищується [67,71,78].

Підтверджено також взаємозв'язок між споживанням кальцію з продуктами харчування та величиною кров'яного тиску. Метааналіз, в якому взяло участь близько 40 тис. осіб, вказав на те, що за високого рівня споживання кальцію знижується як систолічний, так і діастолічний тиск [79]. Низькі концентрації йонів кальцію в сироватці крові виявлено у пацієнтів, які страждають на гіпертонію [80]. Відомо кілька можливих механізмів зниження кров'яного тиску за участю кальцію. Один із них полягає в тому, що за гіпокальціємії знижується активність Са-АТФ, а це, у свою чергу, призводить до збільшення кількості вільного внутрішньоклітинного кальцію та скорочення гладких м'язів [81]. Для людей із недостатнім базовим споживанням кальцію, особливо для чутливих до солі хворих на гіпертонію, доволі ефективними виявились харчові добавки з вмістом цього елемента [82]. У хворих на гіпертонію часто підвищені рівні регуляторних гормонів кальцію, паратгормону та активний вітамін Б ($1,25\text{-(OH)}_2\text{-D}$), що може

призводити до підвищення загального периферійного тиску. Кальцій харчових добавок пригнічує ці гормони і, як наслідок, кров'яний тиск знижується. Він та його регуляторні гормони також здатні впливати на кров'яний тиск через центральну нервову систему. Цей елемент спричинює натрійурез, який, згідно з результатами досліджень, знижує кров'яний тиск у жінок постклімактеричного віку, які страждають на гіпертонію [83].