

# Химический состав почв

- Избирательное поглощение веществ растениями изменяет почвы по сравнению с материнской породой.
- Гл. особенность – значительное содержание в почве **органического углерода** и **азота**, обычно отсутствующих в породе.
- Благодаря концентрации растениями и микроорганизмами в почве накапливаются и другие биофильные элементы – фосфор, сера, калий, кальций, магний и другие.

# Коэффициент поглощения (зола/почва)

- Бор – 33
- магний – 3,6,
- фосфор – 7,4,
- калий – 1,2,
- сера 100,
- кальций – 1,0,
- алюминий – 0,2,
- кремний – 0,5,
- железо – 0,2,
- кадмий – 0,08

# Углерод

- В почвенном воздухе -  $\text{CO}_2$ , в почвенном растворе – угольная кислота, в аридных почвах –  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
- Набор соединений в органическом веществе до сих пор не подсчитан, от низкомолекулярных (метан  $\text{CH}_4$ , аминокислоты, простейших кислот жирного ряда, моносахариды) до высокомолекулярных (целлюлоза, лигнин, полипептиды).
- Особое место – специфические для почв гумусовые вещества: гуминовые кислоты, фульвокислоты, гумины.

# Азот

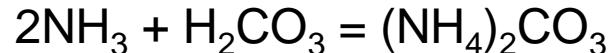
- Содержание **азота (N)** в земной коре составляет 0,023 %. Главным источником – атмосфера. Над каждым гектаром земли – в воздухе свыше 70 тыс. тонн, но молекулярный азот воздуха недоступен для растений (азотфиксирующие организмы).
- Основная часть азота находится в почве в виде сложных органических соединений, небольшая часть – в виде необменно-поглощенных ионов аммония в кристаллической решетке. В среднем в пахотном горизонте 0,1 % азота от веса почвы.
- Основная масса азота в почве недоступна для растений. Растения и животные могут поглощать азот в форме азотнокислых и аммонийных солей. В малой степени они могут усваивать растворимые в воде амиды и простейшие аминокислоты. Обеспечение биоты азотом зависит от скорости минерализации азотистых органических веществ.
- **белки, гумусовые вещества → аминокислоты, амиды → аммиак → нитриты → нитраты.**

# Бактерии

- **Бактерии** переводят свободный азот в связанный. Известны аммонифицирующие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, азотфиксирующие и другие бактерии. **Аммонифицирующие** бактерии осуществляют распад азотистых органических веществ почвы до аммиака – **аммонификацию**. Под воздействием ферментов, выделяемых микробами, белковые вещества гидролизуются до аминокислот. Последние легко усваиваются микроорганизмами и под действием ферментов микробных клеток подвергаются процессам **дезаминирования** и **дезамидирования**. В результате от амино- и амидосоединений отщепляется аммиак и образуются различные органические кислоты. Например:



- Выделяющийся аммиак образует соли с органическими и минеральными кислотами, которые получают при минерализации органического вещества почвы:

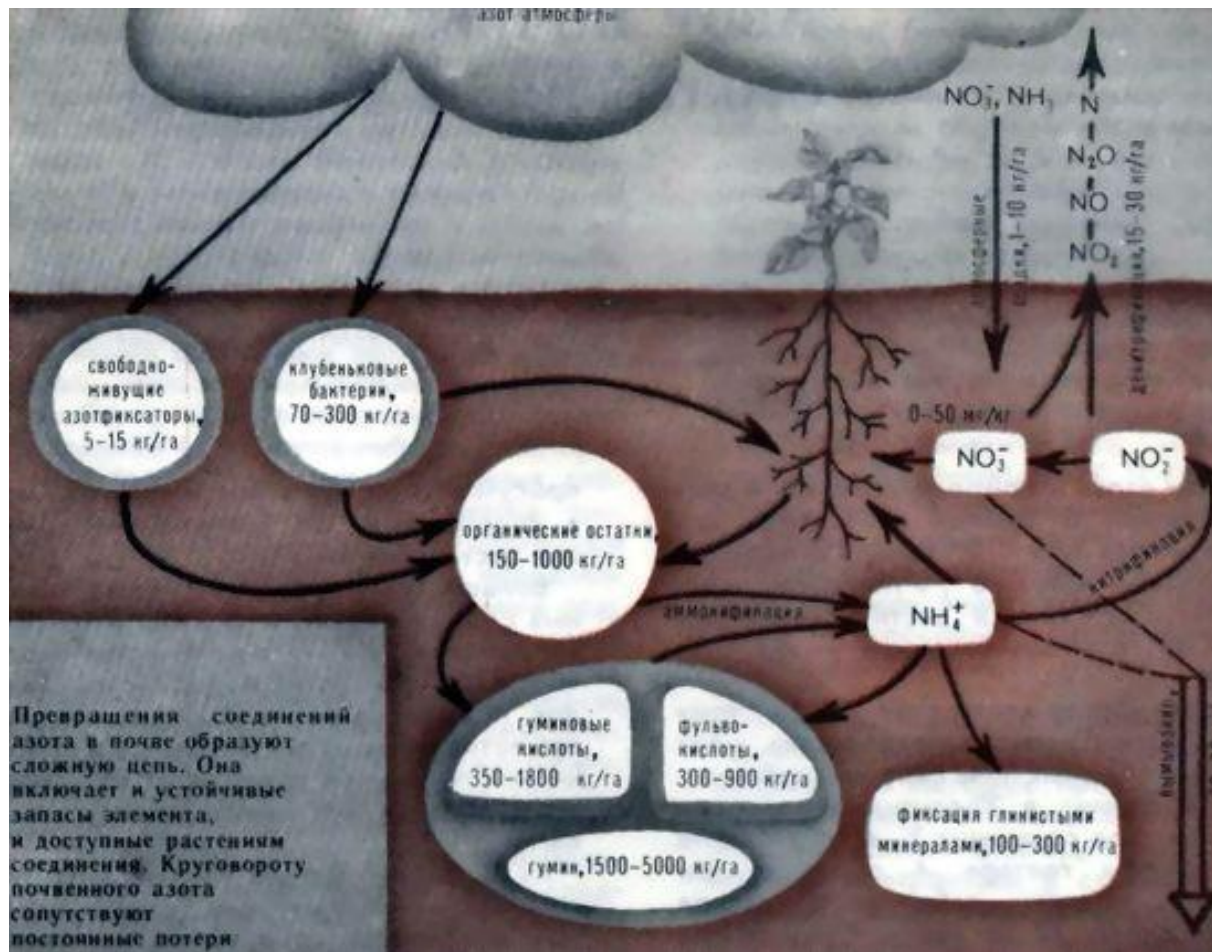


- Аммоний поглощается почвенными коллоидами

# Нитрификация

- В аэробных условиях соли аммония окисляются до нитратов – **нитрификация**. Нитрификация может идти по следующему уравнению:
- $2\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 = 2\text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  (первая фаза)
- $2\text{HNO}_2 + \text{O}_2 = 2\text{HNO}_3$  (вторая фаза)
- $2\text{HNO}_3 + (\text{ППК}) \text{Ca} = (\text{ППК}) \text{H H} + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{NO}_3^-$
- Также под влиянием бактерий идет процесс **денитрификации** – восстановление нитратного азота до газообразного.
- В почве происходит также процесс **вымывания** нитратов из почвы дренажными водами. Это связано с тем, что нитраты находятся преимущественно в почвенном растворе. Нитратный азот ( $\text{NO}_3$ ) не образует в почве каких-либо малорастворимых солей и не поглощается

# Цикл углерода



# Роль азота

- Содержание и формы азота в почвах оказывают большое влияние на рост и развитие растений. При недостатке азота их рост ухудшается. При нормальном азотном питании растений повышается синтез белковых веществ, усиливается жизнедеятельность организмов, ускоряется рост и задерживается старение листьев. Избыток азота задерживает созревание растений, способствуют образованию большой вегетационной массы, уменьшает количество зерна, клубней, корнеплодов.
- Азот – один из основных элементов, необходимых для питания растений. Он входит в простые и сложные белки, которые являются главной составной частью протоплазмы растительной клетки, в состав нуклеиновых кислот, содержится в хлорофилле, фосфатидах, алкалоидах, витаминах, ферментах и других органических веществах клеток.



# Фосфор в земной коре – 0,08 %

- Основная масса фосфора находится в природных фосфатах (170 видов), а также в породах с фосфорсодержащими минералами (амблигонит, вивианит, монацит, пироморфит и т.д.).
- Минеральные формы фосфора в почвах чаще преобладают над органическими. представлены в основном труднорастворимыми фосфатами кальция, железа и алюминия. Большая часть минерального фосфора не доступна растениям
- Глинистые минералы адсорбируют фосфат-ионы сильнее всего в кислой среде, особенно монтмориллонит
- Фосфор органических соединений составляет в пахотном слое до половины всего содержащегося в почве фосфора. Наибольшая часть органических фосфатов представлена фитатами (соли фитиновой кислоты). В кислых почвах преобладают фитаты железа и алюминия, в нейтральных – фитаты кальция. При распаде гумуса под влиянием микроорганизмов высвобождаются доступные минеральные соли фосфорной кислоты, но не накапливаются в больших количествах в водорастворимом состоянии, так как связываются почвой химически, физико-химически и биологически.
- В живых организмах фосфор входит в состав кислот и органических соединений, участвует в углеводном, жировом, азотном обмене растений, входит в состав скелета позвоночных, играет роль в нервной и других тканях.

# ***Калий (K) в земной коре – 2,14 %, в почвах – 1,36 %.***

- Калием богаты почвы, образующиеся на кислых осадочных породах. Больше калия в тяжелых почвах, так как он входит в состав минералов, образующих преимущественно глинистые частицы. В (су)глинистых почвах общее количество  $K_2O$  достигает 2–3 %. В почве – 5 групп калия по доступности растениям:
- **Калий в алюмосиликатах** (ортоклазе (полевоом шпате) –  $K_2Al_2Si_6O_{16}$ , биотите –  $(H,K)_2(Mg,Fe)_2(Al,Fe)_2(SiO_4)_3$ , глауконите –  $K_2O \cdot 4R_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot nH_2O$ , мусковите –  $H_2KAl_3Si_3O_{12}$ , и т. д.) – слабо доступен.
- **Калий**, адсорбционно-связанный на поверхности почвенных коллоидов (**обменный**). Его содержание колеблется от 0,1 до 1,5 смоль/кг почвы. От валового содержания калия в почве эта форма составляет только 0,8–3,0 %, тем не менее обменный калий играет самую важную роль в питании растений.
- **Водорастворимый калий**. Составляет 10–20 % от количества обменного калия.
- **Калий**, входящий в состав плазмы **микроорганизмов**. Этот калий становится доступным для растений только после отмирания микроорганизмов.
- **Калий необменный**, закреплен внутри кристаллической решетки. Трехслойные минералы заметно фиксируют калий, так как им свойственна внутрикристаллическая адсорбция катионов. Гумусовые соединения и подщелачивание почвы увеличивают переход калия в обменную форму. Между обменным и необменным калием в почве существует некоторое равновесие. Растения поглощают элемента больше, чем убывает содержание в почве обменного калия. Пополнение запасов обменного калия, смещаемого под влиянием растений, объясняется постоянным освобождением из необменной формы.
- Корни растений выделяют ионы водорода, которые вытесняют другие катионы (и среди них калий) из минералов почвы. Общее содержание калия в отдельных фракциях почв возрастает с увеличением дисперсности частиц.

# Железо (Fe) – 5 % массы литосферы

- В земной коре входит в состав около 300 минералов. Поведение железа в окружающей среде определяется его способностью легко изменять валентность в зависимости от физико-химических условий среды, а также тесно связано с геохимическими циклами кислорода, серы, углерода. Окисленные и щелочные условия среды способствуют осаждению железа, кислые и восстановительные – растворению его соединений. Свободное железо фиксируется в виде оксидов и гидроксидов, замещает магний и алюминий в других минералах, образует комплексы с органическими лигандами. Содержание элемента в почвах изменяется от 0,5 до 5 %.
- В почвах железо присутствует в виде оксидов и гидроксидов, определяющих цвет многих почв, преобразованию соединений железа способствует органическое вещество, а также микроорганизмы.
- В растворении почвенного железа участвуют многие реакции, в частности, гидролиз и процессы комплексообразования. Количество растворимого железа составляет незначительную часть его общего содержания в почве. Растворимые неорганические формы включают:  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3^-$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_4^{2-}$ . Катионы  $\text{Fe}^{2+}$  в кислых анаэробных почвах могут достигать токсичных для растений уровней. В нейтральных и слабощелочных почвах подвижность железа резко падает и возможен его дефицит для растений. В условиях заболоченных почв происходит восстановление железа  $\text{Fe}^{3+}$  до  $\text{Fe}^{2+}$  с резким увеличением подвижности. Этот процесс тесно связан с метаболической деятельностью бактерий и приводит к высокой концентрации подвижного железа в некоторых затопляемых почвах.
- Почвы с дефицитом железа для сельскохозяйственных растений распространены достаточно широко (карбонатные, щелочные, марганцево-железистые разновидности почв). Однако даже на бедных железом почвах его абсолютного дефицита для растений не отмечается. Наблюдается недостаток только легкорастворимых форм.

# Марганец и алюминий

- **Марганец (Mn)** присутствует в виде ионов  $Mn^{2+}$ ,  $Mn^{3+}$ ,  $Mn^{4+}$ . Катионы  $Mn^{2+}$  способны замещать двухвалентные катионы некоторых элементов в силикатах и оксидах.
- Поведение марганца в почвах сложное и зависит преимущественно от pH и Eh среды, поэтому наиболее распространенными являются реакции окисления – восстановления и гидролиз. Образует много оксидов и гидроксидов, которые осаждаются на почвенных частицах, а также конкреций. Соединения марганца способны быстро окисляться и восстанавливаться при изменении условий почвенной среды. Окислительные условия снижают доступность марганца для биоты, восстановительные – увеличивают. Марганец не считается загрязняющим почву металлом, однако при избыточных содержаниях, выше ПДК, он становится загрязнителем и может оказывать токсичное действие на растения.
- **Алюминий (Al)**. Его кларк в литосфере – 8,8. Число минералов, содержащих алюминий, исчисляется сотнями. Единственный устойчивый и широко распространенный ион  $Al^{3+}$ . При выветривании минералов образуется ряд гидроокисных соединений алюминия различного заряда и состава ( $Al(OH)^{2+}$ ,  $Al(OH)_6^{3-}$ ), и эти частицы затем становятся структурными компонентами глинистых минералов. Растворимость гидроксидов алюминия низкая, особенно в интервале pH 5–8. Свежеосажденные гидроксидные формы Al и коллоидные частицы способны к адсорбции анионов. В кислых почвах с pH 5,5 и ниже подвижность металла резко возрастает, он может быть токсичным и при ионном обмене он активно конкурирует с другими катионами. В нейтральных почвах содержание алюминия в растворах составляет 0,4 мг/л, в почвенном растворе с pH 4,4 – 5,7 мг/л.

# Кальция в литосфере – 3,6 %, магния – 2,1 %

- Обычно Са и Mg достаточно для удовлетворения потребностей растений, и эти элементы, особенно кальций, не считаются удобрительными. Большая их часть – в виде труднорастворимых соединений, но при почвообразовательных процессах они переходят в более растворимые формы, которые могут быть потреблены растениями в процессе роста. Встречаются в почве и растениях в виде двухвалентного катиона. Наиболее доступными для растений являются обменно-поглощенные почвенными коллоидами ионы этих элементов. Так, на дерново-подзолистой почве содержание обменного кальция в пахотном слое составляет 500–1000 мг/кг почвы, или 20–30 % от валового, магния – 100–300 мг/кг почвы, или 5–10 % от валового. При окультуривании дерново-подзолистых почв доля подвижных форм Са и Mg от валовых обычно растет. Оптимальное соотношение подвижных магния и кальция – 0,4–0,8.
- Обычно в некислых почвах **кальций** занимает 75–85 % общей емкости катионного обмена, что определяется предпочтительной адсорбцией иона кальция по сравнению с другими ионами благодаря сравнительно малому его гидратированному радиусу по отношению к его двойному положительному заряду. Обменный кальций удерживается почвой сильнее, чем магний (в 2–4 раз) или калий (в 4–6 раз), и в силу незначительной потребности растений в кальции его можно считать микроэлементом.
- **Магний** в химическом отношении сходен с кальций-ионом, но поведение его существенно отличается. В негидратированном виде ион магния достаточно мал, чтобы входить в кристаллическую решетку ряда минералов, тогда как для кальция нужны большие пространства. Магнийсодержащие минералы сильно выветриваются, что ведет к истощению их запасов в почвах. Обычно 12–18 % обменных позиций в почве занято магнием, и его достаточно для нормального питания растений, но для легких почв иногда отмечается его недостаток.
- В дерново-подзолистых почвах Беларуси валовое содержание кальция и магния существенно меньше их кларков, поскольку ионы этих элементов сильно вымываются. В естественных почвах за тысячелетия процесс выщелачивания огромен, следствием чего является повышенная генетическая кислотность почти всех почв гумидной зоны и Беларуси, в частности.
- Кальций и магний являются важными элементами и как составные части культурных растений. Кальций – структурный элемент клеточных оболочек, и поэтому он жизненно необходим для образования новых клеток, прочно связан со старыми клетками. Основная его роль – в поддержании в растениях баланса питательных веществ, для целостности плазмалеммы. Недостаток кальция сдерживает рост всех частей растения, что может привести и к усилению недостаточности других элементов из-за слабо развитой корневой системы.
- Растениям жизненно необходим магний для образования хлорофилла (2,7 % молекулы хлорофилла), где он фактически является единственным металлом и в этом смысле уникален. Много магния в семенах растений. Магний часто обгоняет кальций по содержанию в растениях, он легко переносится из одной части растения в другую, и осветление зеленой окраски листьев, особенно нижних, может быть свидетельством недостатка магния. Магний увеличивает синтез белка и содержание крахмала в картофеле. Он активизирует физиологические процессы в растениях, повышает устойчивость к засухе, увеличивает содержание белкового азота, углеводов, эфирных масел, жиров и других восстановленных соединений.

# Микроэлементы

- В количественном отношении микроэлементы составляют ничтожную долю в составе почвы, однако они играют важную роль как микрокомпоненты для питания растений. Сейчас только для десятков микроэлементов известно, что они жизненно важны для всех растений. Для нескольких доказано, что они необходимы небольшому числу растений, для остальных их функции пока не установлены.
- Поведение микроэлементов в почве различно для разных элементов. Микроэлементы наследуются от материнских пород, однако их распределение в почвенных профилях и между компонентами почв отражают действие различных почвообразовательных процессов и вмешательство внешних факторов.
- **Бор (В).** Среднее содержание элемента в земной коре –  $3 \times 10^{-4} \%$ , в почвах в 10-40 раз выше. При химическом выветривании пород элемент легко переходит в раствор, образуя различные анионы ( $\text{BO}^{2-}$ ,  $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$  и т.д.). Бор сорбируется почвой гораздо сильнее, чем другие анионы. Бор сильнее удерживается полуторными окислами, чем глинистыми минералами, и водный оксид алюминия в этом отношении наиболее эффективен. Бор влияет на многие физиологические процессы растений, например, образование сахара у сахарной свеклы. Среди микрокомпонентов питания бор считается наиболее подвижным элементом в почвах, легко вымывается вниз по почвенному профилю. Глинистые почвы содержат бора больше, чем песчаные. В большинстве почв, особенно гумидных областей, он сравнительно дефицитный элемент. При его избыточном внесении с удобрениями, применении сточных вод количество элемента в почвах может стать опасным.

# Медь и цинк

- **Медь (Cu).** Среднее содержание меди в земной коре – 0,01 %. Образует много минералов, наиболее распространены простые и сложные сульфиды. Они легко поддаются процессам выветривания и высвобождают ионы меди, особенно в кислых средах. Ионы Cu могут легко осаждаться такими анионами, как сульфид, карбонат и гидроксид, поэтому медь является малоподвижным элементом в почвах. Средние валовые содержания Cu в почвах колеблются от 6 до 60 мг/кг, при этом минимум приходится на песчаные и торфяно-болотные почвы. Максимальные количества Cu аккумулируются в верхних горизонтах почв, что связано с ее биоаккумуляцией и современными техногенными поступлениями. Преобладающей подвижной формой меди в почвах является двухвалентный катион. Медь хорошо связывают органические составляющие почв.
- Загрязнение почв соединениями меди связано с промышленным производством и использованием медьсодержащих веществ: удобрений, сельскохозяйственных и коммунальных отходов. При загрязнении почв вблизи индустриальных источников ее содержание часто возрастает до опасных значений превышающих пороговые. Методы обезвреживания почв от избытка меди основаны на внесении извести, торфа, фосфатов.
- **Цинк (Zn)** встречается в виде многочисленных собственных минералов, а также в виде примесей в слюдах, амфиболах и других минералов. Главные минеральные виды цинка представлены сульфидами, сульфатами, силикатами, фосфатами. Среднее содержание элемента в почвах, как и в земной коре – 0,005 %. Цинк легко адсорбируется как минералами, так и органическими компонентами, часто аккумулируется в верхних горизонтах.
- Атмосферные поступления Zn превышают его вынос за счет выщелачивания и образования биомассы. Основной, наиболее подвижной формой цинка в почвах считается  $Zn^{2+}$ , достаточно прочно удерживаемый глинами и органическим веществом. Цинк наиболее подвижен и биологически доступен в кислых легких минеральных почвах. Растворимость и доступность Zn в почвах имеет обратную корреляцию со степенью насыщенностью кальцием и содержанием соединений фосфора.
- Антропогенные источники цинка – предприятия цветной металлургии и агротехническая деятельность. Восстановление качества загрязненных цинком почв основано на ограничении его биологической доступности путем внесения извести или органического вещества.

# Молибден и кобальт

- **Молибден (Mo).** Содержание элемента в земной коре – 0,003 %. Природные соединения молибдена весьма разнообразны. В свободном состоянии Mo в природе не найден. Содержание элемента в почвах близко к его концентрации в материнских породах. В почвах мира изменяется в пределах 0,013–17,0 мг/кг. В почвах среди других микроэлементов молибден выделяется меньшей растворимостью в кислых почвах и подвижностью в щелочных. На увлажненных щелочных почвах Mo более доступен для растений.
- Растения поглощают Mo из почвы в виде водорастворимых соединений. Основная его функция – участие в усвоении растениями азота, а также использованию фосфора и кальция. Недостаток или избыток элемента в почвах вызывает заболевание растений и животных. Для повышения доступности Mo для растений проводят известкование кислых почв или применяют соли молибдена. Возможно техногенное загрязнение в результате добычи, выплавки и обработки металлов, рафинирования нефти, использования сточных вод на полях.
- **Кобальт (Co).** Среднее содержание кобальта в земной коре равно 0,005 %. Известно около 130 минералов, в состав которых входит Co. В природных условиях кобальт встречается в двух состояниях окисления –  $Co^{2+}$  и  $Co^{3+}$ , а также комплексного аниона  $Co(OH)^{3-}$ . В геохимических циклах он тесно связан с железом и марганцем. Оксиды железа обладают высокой способностью к адсорбции кобальта. Важными факторами поведения Co в почвах являются органическое вещество и содержание в почве ила. С органическим веществом кобальт способен давать комплексные соединения, поэтому он накапливается в гумусовом горизонте почв. В кислой среде кобальт относительно подвижен, но из-за активной сорбции оксидами Fe и Mn, глинистыми минералами этот металл не мигрирует.
- Токсичное действие Co на растения наблюдается редко. Как правило, его высокие концентрации в почвах и избыточные накопления в растениях связаны с техногенной деятельностью, например, в результате загрязнения почв в районах выплавки цветных металлов и при сжигании угля.



# Тяжелые металлы в почвах

- В настоящий момент для обозначения практически одинаковой группы химических элементов широко применяются два различных термина: микроэлементы и тяжелые металлы.
- **Микроэлементы** – понятие, зародившееся в геохимии и ныне активно используемое в сельскохозяйственных науках, медицине, токсикологии, санитарии. Оно обозначает группу химических элементов, которые содержатся в природных объектах в очень малых количествах – менее 0,01 %, как правило,  $10^{-3}$ – $10^{-12}$  %. Формально в основу выделения положена их распространенность в природе, которая для разных природных сред и объектов (литосфера, педосфера, донные осадки, гидросфера, растения, животные и др.) существенно различается.
- Термин «**тяжелые металлы**» в большей степени отражают эффект загрязнения окружающей среды и токсичное воздействие элементов при их поступлении в биоту. Он заимствован из технической литературы, где применяется для обозначения химических элементов с плотностью более  $5 \text{ г/см}^3$ . Если исходить из этого показателя, тяжелыми следует считать 43 из 84 металлов, входящих в Периодическую систему элементов Менделеева. Однако при такой трактовке под данное определение не попадают Be, Al, Sc, Ti, Rb, Sr, Cs, Ba, которые при избыточных концентрациях также бывают опасными. В современную трактовку термина «тяжелые металлы» чаще включают большую группы токсичных химических элементов, в том числе и неметаллов. Приоритетными загрязнителями считаются Pb, Cd, Zn, Hg, As и Cu, так как их техногенное накопление в окружающей среде идет очень высокими темпами. Эти элементы обладают большим сродством к физиологически важным органическим соединениям. Их избыточные количества в организме живых существ нарушают все процессы метаболизма и приводят к серьезным заболеваниям человека и животных. В то же время, многие из элементов (Co, Cu, Zn, Cr, Se, Mn) довольно широко используются в производстве (особенно в сельском хозяйстве, медицине и др.) под названием микроэлементы.

# Хром и свинец

- Содержание **хрома (Cr)** в почвах зависит от его содержания в материнских породах. Хром отличается широким разнообразием состояний окисления и способностью формировать комплексные анионные и катионные ионы ( $\text{Cr}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{CrO}^{3-}$ ). В почвах большая часть хрома присутствует в виде нерастворимого  $\text{Cr}^{3+}$ . Поведение хрома зависит от pH и окислительно-восстановительного потенциала почв.
- На поведение хрома в почвах большое влияние оказывают и органические комплексы. В результате окисляющей способности соединений марганца в почвах может наблюдаться окисление  $\text{Cr}^{3+}$ . Хром является и элементом питания растений. Снижение его подвижности хрома в почвах может приводить к дефициту в растениях. Легко растворимый в почвах  $\text{Cr}^{6+}$  токсичен для растений и животных. Известкование, применение фосфора и органических веществ заметно снижает токсичность хрома в загрязненных почвах.
- Содержание **свинца (Pb)** в земной коре составляет 0,0016 %. Естественное содержание свинца в почвах колеблется от 3 до 189 мг/кг, его главная форма – галенит  $\text{PbS}$ . При выветривании сульфиды свинца медленно окисляются. Свинец присутствует в виде  $\text{Pb}^{2+}$  и по геохимическим свойствам способен замещать K, Ba, Sr, Ca как в минералах, так и при процессе сорбции. Из-за широкомасштабного загрязнения свинцом многие почвы обогащены этим элементом.
- Среди тяжелых металлов он наименее подвижен. При высоких значениях pH свинец осаждается в почве в виде гидроксида, фосфата, карбоната. Уровни содержаний, при котором элемент становится токсичным, колеблются в пределах 100–500 мг/кг. Загрязнение почв свинцом носит необратимый характер, поэтому накопление элемента в верхнем горизонте почв будет идти даже в условиях его небольшого приноса. Содержание свинца в корнях растений коррелирует с его содержанием в почвах, что указывает на поглощение элемента растениями. Высокие его концентрации могут тормозить микробиологические процессы, особенно в почвах с низким ЕКО.

# Кадмий и ртуть

- **Кадмий (Cd)** является рассеянным элементом. Распространенность кадмия в земной коре составляет  $5 \times 10^{-5} \%$ , в почвах – от 0,07 до 1,1 мг/кг. Геохимия Cd тесно связана с геохимией цинка, он обнаруживает большую подвижность в кислых средах. При выветривании кадмий легко переходит в раствор, где присутствует в виде  $Cd^{2+}$ . Он может образовывать комплексные ионы  $CdCl^+$ ,  $CdOH^+$ ,  $CdHCO_3^+$ ,  $Cd(OH)^3-$ ,  $Cd(OH)_4^{2-}$ , а также органические хелаты. Подвижность ионов кадмия контролируют pH среды и окислительно-восстановительный потенциал.
- Для кадмия больше характерна миграция вниз по профилю, чем накопление в верхних горизонтах почв. Загрязнение почв Cd опасно для биоты. Максимальные уровни кадмия в почвах характерны для районов свинцово-цинковых рудников, вблизи предприятий цветной металлургии, на сельскохозяйственных угодьях, где используются сточные воды и фосфорные удобрения. Для уменьшения токсичности Cd в почвах используются методы, направленные на повышение pH и катионообменной емкости почв.
- **Ртуть (Hg)** и ее сульфид (киноварь) известны человеку с давних времен. Это единственный металл, который при обычной температуре находится в жидком виде. Содержание ртути в земной коре составляет  $1 \times 10^{-6} \%$ . Известные в природе соединения ртути составляют около 20 минералов. Важными геохимическими свойствами ртути являются: образование сильных связей с серой; образование органо-металлических соединений, сравнительно устойчивых в водной среде; летучесть элементарной ртути.
- Сорбция  $Hg^{2+}$  в почве изменяется в зависимости от величины pH, будучи максимальной при pH 4–5. Средние концентрации ртути в поверхностном слое почвы не превышают 400 мкг/кг. Загрязнение почв ртутью связано с предприятиями, производящими тяжелые металлы, с химическим производством, с применением фунгицидов. Даже простые соли Hg создают опасность для растений и почвенной биоты из-за отравляющих свойств паров ртути. Потребление элемента корнями растений может быть сведено до минимума путем внесения извести, серосодержащих соединений и твердых фосфатов.

# Мышьяк и никель

- **Мышьяк (As)** известен с древности. Еще Аристотель и Теофраст упоминают о естественных сернистых соединениях мышьяка, применявшихся в качестве лечебных средств и красок. Среднее содержание элемента в земной коре –  $5 \times 10^{-4}$  %. Элемент связан с месторождениями других минералов и выступает как индикатор при поисковых геохимических работах. Минералы мышьяка хорошо растворимы, но интенсивность его миграции невелика вследствие активной сорбции глинистыми частицами, гидроксидами, органическим веществом.
- Наиболее распространенная форма мышьяка в условиях окружающей среды –  $As^{5+}$ . Сорбированный почвой мышьяк с трудом поддается десорбции, а прочность связывания элемента почвой с годами увеличивается. Максимальные концентрации мышьяка связаны с аллювиальными и высокогумусированными почвами, минимальные – с песчаными. Увеличение окислительного состояния почв, применение веществ, способствующих осаждению и связыванию элемента (сульфата железа, карбоната кальция), ограничивает биодоступность мышьяка, снижает его токсичность. Внесение фосфатных удобрений также снижает поступление элемента в биоту.
- **Никель (Ni)**. Содержание никеля в земной коре составляет 0,008 %. Обычно он присутствует в виде сульфидов и арсенидов. В соединениях никель главным образом двух- и трехвалентен, относительно стабилен в водных растворах и может мигрировать на большие расстояния. Самые высокие содержания Ni – в тяжелых и высокогумусированных почвах. В настоящее время никель считается серьезным загрязнителем. В осадках сточных вод Ni присутствует в форме легкодоступных органических хелатов и может быть фитотоксичным. Снижению его доступности способствуют внесение фосфатов или навоза.
- В атмосферу **Беларуси** от стационарных источников сжигания топлива попадает 72 % мышьяка, 57 % ртути, около 99 % никеля, 27 % кадмия, 33 % хрома, 27 % меди, 15 % свинца, 11 % цинка. Цементное производство привносит много кадмия, свинца, хрома. Передвижные источники в основном загрязняют атмосферу цинком и медью.
- Кроме атмосферных выпадений, значительное количество металлов привносится в почву при использовании удобрений, в том числе на основе осадков сточных вод и бытовых отходов. В составе примесей в удобрениях находится кадмий, хром, медь свинец, уран, ванадий и цинк, с отходами интенсивного животноводства и птицеводства – медь и мышьяк, с компостом и навозом – кадмий, медь, никель, цинк и мышьяк, с пестицидами – кадмий, мышьяк, ртуть, свинец, марганец и