



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Γεωχημεία

Ενότητα 2: Γεωχημικές διεργασίες στην επιφάνεια
της γης

Αριάδνη Αργυράκη

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος

Γεωχημικές διεργασίες στην επιφάνεια της γης

Οξειδοαναγωγικές Γεωχημικές Διεργασίες

Περιεχόμενα

1. Ορισμοί
2. Εξισορρόπηση αντιδράσεων οξειδοαναγωγής
3. Διαγράμματα Eh-pH
4. Σημαντικές βιο-γεωχημικές αντιδράσεις



ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ

- Μεταφορά ηλεκτρονίων μεταξύ χημικών ειδών με διαφορετικό σθένος (αριθμό οξείδωσης) π.χ. $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$
- Οξείδωση: Απώλεια ηλεκτρονίων
- Αναγωγή: Πρόσληψη ηλεκτρονίων
- $2\text{Fe}^{2+} + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 6\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
(Ο σίδηρος οξειδώνεται)
- $\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$
(Το Mn ανάγεται)
- $2\text{Fe}^{2+} + \text{MnO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 2\text{H}^+ + \text{Mn}^{2+}$

οξειδοαναγωγή

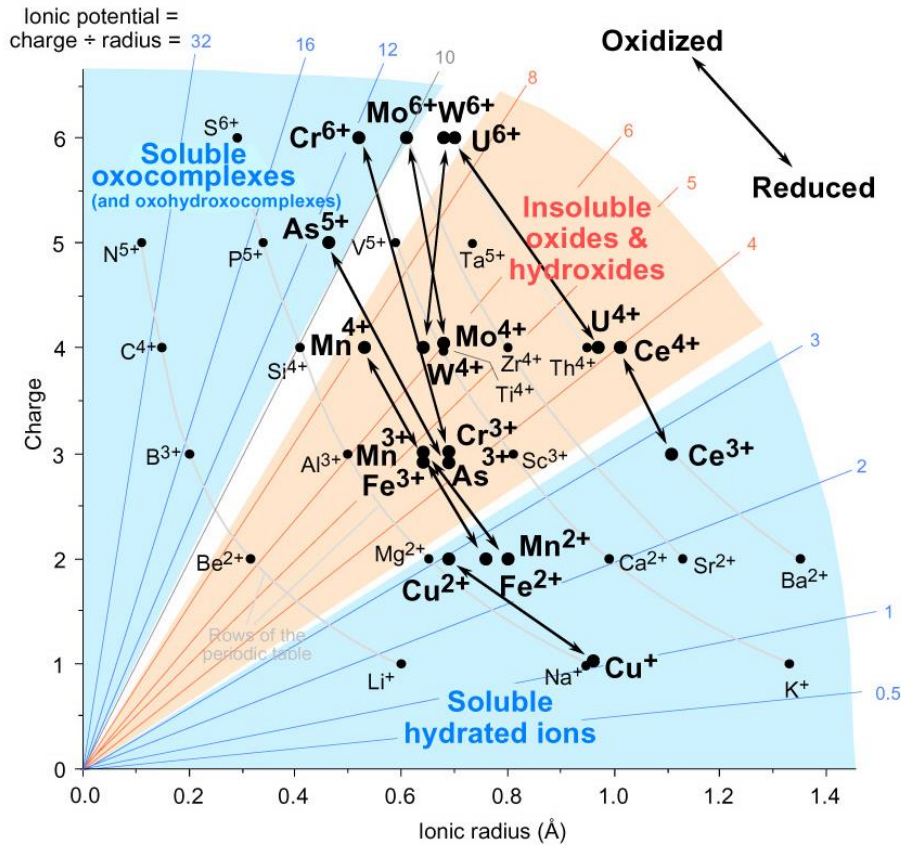


Σημασία οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων

- Σχέση σθένους στοιχείων και γεωχημικής συμπεριφοράς στα γήινα διαλύματα (γλυκό ή θαλασσινό νερό, υδροθερμικά διαλύματα)- π.χ. ο Fe^{2+} είναι διαλυτός ενώ ο Fe^{3+} όχι. Το U^{6+} είναι διαλυτό , ενώ το U^{4+} όχι.
- Οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα κατά τις μαγματικές, διαγενετικές, μεταμορφικές διεργασίες καθώς και κατά τη χημική αποσάθρωση και τη γένεση κοιτασμάτων.
- Βάση της ηλεκτροχημείας, μεταλλουργίας και επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.



Μεταβολή διαλυτότητας ανάλογα με το οξειδωτικό σθένος



1

Οι οξειδοαναγωγικές συνθήκες καθορίζουν την κινητικότητα πολλών στοιχείων στο επιφανειακό περιβάλλον καθώς μεταβάλουν το ιοντικό δυναμικό τους



Οξειδοαναγωγή και περιοδικός πίνακας

Railsback's *Some Fundamentals of Mineralogy and Geochemistry*

A periodic table of redox behavior

	H																		He
He	Li	Be											B	C	N	O	F		Ne
Ne	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ar	Cd	In	Sn	Sb	Te	I		Xe
Xe	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At		Rn
Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U													

■	■	■	■	■	■	■	■	■
	(+)	Σθένη	Σθένη	Σθένη	Σθένη		(-)	
	σθένος	> 0	>0 =0	>0 < 0 = 0	< 0 =0		σθένος	
Δεν							Δεν	
συμμετέχουν							συμμετέχουν	
σε οξ/κές							σε οξ/κές	
αντιδράσεις							αντιδράσεις	
στη φύση							στη φύση	

Συμμετέχουν σε οξ/κές αντιδράσεις στη φύση



ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΑΤΟΜΩΝ- ΙΟΝΤΩΝ

- Η κατάσταση οξείδωσης ατόμου σε στοιχειακή μορφή είναι ίση με 0. π.χ. στο O_2 το O έχει οξειδωτικό σθένος 0.
- Στις χημικές ενώσεις του, το O έχει οξειδωτικό σθένος -2 και το H +1 (εκτός από ενώσεις υπεροξειδίων). π.χ. στην ανθρακική ρίζα (CO_3^{2-}) το O έχει σθένος -2 και ο C +4.
- Η κατάσταση οξείδωσης μονατομικών ιόντων ισούται με το σθένος του ιόντος. Π.χ. στο ιόν Fe^{2+} ο Fe βρίσκεται στην κατάσταση οξείδωσης +2.



ΕΞΙΣΟΡΡΟΠΗΣΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΗΣ

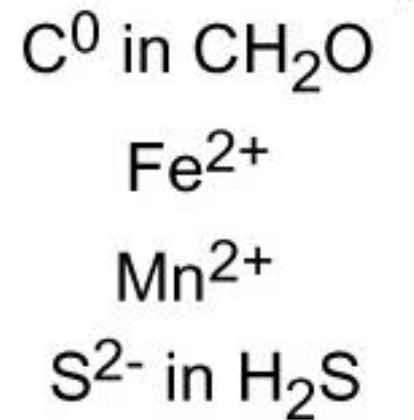
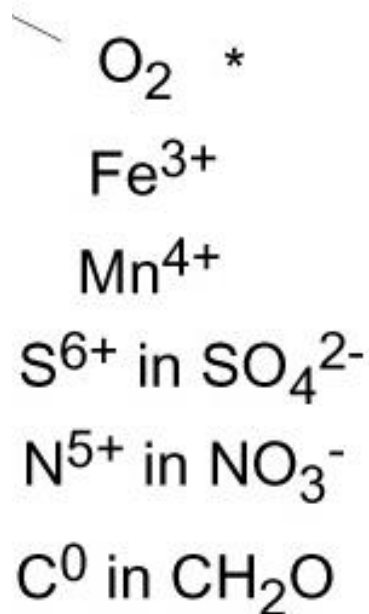
1. Προσδιορισμός σθένους όλων των στοιχείων που λαμβάνουν μέρος στην αντίδραση.
2. Προσδιορισμός αριθμού ηλεκτρονίων που μετακινούνται κατά την αντίδραση → εξισορρόπηση φορτίου.
3. Εξισορρόπηση στοιχειομετρικών συντελεστών για κάθε στοιχείο εκτός O και H στα αντιδρώντα και τα προϊόντα.
4. Εξισορρόπηση O με προσθήκη H_2O .
5. Εξισορρόπηση H με προσθήκη H^+ .



Οξειδωτικοί-αναγωγικοί παράγοντες

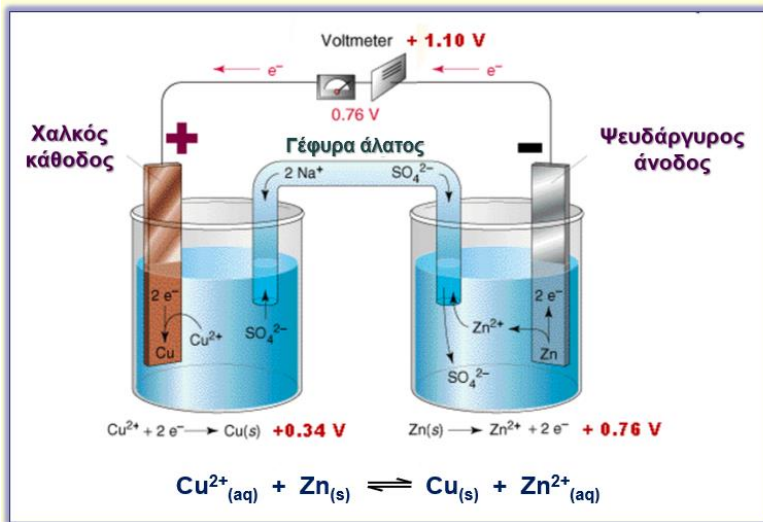
Οξειδωτικοί παράγοντες
Συλλέκτες ηλεκτρονίων
Προκαλούν οξείδωση και ανάγονται

Αναγωγικοί παράγοντες
Δωρητές ηλεκτρονίων
Προκαλούν αναγωγή και οξειδώνονται



Ηλεκτρεγερτική δύναμη-Κανονικό δυναμικό ημιαντίδρασης (E^0)

ΓΑΛΒΑΝΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ



3

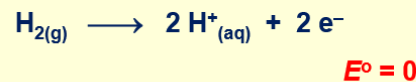
(από σημειώσεις Χημείας
Π. Παρασκευοπούλου- Α' Εξάμηνο)

- Η ΗΕΔ αποτελεί μέτρο της κινητήριας δύναμης της αντίδρασης του στοιχείου.
- Η ΗΕΔ ενός στοιχείου εξαρτάται από τις συγκεντρώσεις των ουσιών που συμμετέχουν στην οξειδοαναγωγική αντίδραση (αντιδρώντων και προϊόντων) και από τη θερμοκρασία.
- Πρότυπες καταστάσεις: ΔE^0 ή $E^0_{\text{στοιχ}}$
 $C = 1 \text{ M}, P = 1 \text{ atm}, 25 \text{ }^\circ\text{C}$

$$E^0_{\text{στοιχ}} = E^0_{\text{οξ}} + E^0_{\text{αναγ}}$$

ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου

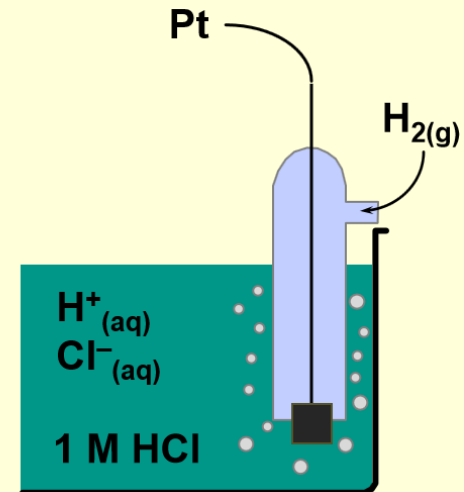


Πρότυπο (ή κανονικό) δυναμικό ημιαντίδρασης

$$E^0_{\text{στοιχ}} = E^0_{\text{οξ}} + E^0_{\text{αναγ}} \Rightarrow$$

$$E^0_{\text{στοιχ}} = E^0_{\text{οξ}} + E^0_{\text{αναγ}} \Rightarrow$$

$$E^0_{\text{στοιχ}} = E^0_{\text{αναγ}}$$



4

ΗΛΕΚΤΡΕΓΕΡΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ

ΗΜΙΑΝΤΙΔΡΑΣΕΩΝ (*Misra 2012*)

Reducing agent	Half-reaction	E^0 (volts)
K	$K \Rightarrow K^+ + e^-$	-2.93
Ca	$Ca \Rightarrow Ca^{2+} + 2e^-$	-2.87
Na	$Na \Rightarrow Na^+ + e^-$	-2.71
Mg	$Mg \Rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$	-2.36
Mn	$Mn \Rightarrow Mn^{2+} + 2e^-$	-1.18
Zn	$Zn \Rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$	-0.76
Fe	$Fe \Rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$	-0.47
Ni	$Ni \Rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$	-0.24
Pb	$Pb \Rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$	-0.13
H ₂	$H_2 \Rightarrow 2H^+ + 2e^-$	0.00 (SHE)
Cu ⁺	$Cu^+ \Rightarrow Cu^{2+} + e^-$	+0.16
Cu	$Cu \Rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$	+0.34
Cu	$Cu \Rightarrow Cu^+ + e^-$	+0.52
Fe ²⁺	$Fe^{2+} \Rightarrow Fe^{3+} + e^-$	+0.76
Ag	$Ag \Rightarrow Ag^+ + e^-$	+0.80
Hg	$Hg \Rightarrow Hg^{2+} + 2e^-$	+0.85
Cl ⁻	$2Cl^- \Rightarrow Cl_2 + 2e^-$	+1.36

* $E^0 = \Delta G_r^0 / n F$ (equation 8.22); ΔG_r^0 calculated using $\Delta G_f^1, 298.15$ values in Robie and Hemmingway (1995) listed in Appendix 6.

Το κανονικό ή πρότυπο δυναμικό οξειδοαναγωγής του ηλεκτροδίου, (E^0), ουσιαστικά δηλώνει τη δυνατότητα προσέλκυσης ηλεκτρονίων και άρα τη δυνατότητα επιτέλεσης μιας αναγωγικής αντίδρασης.

Ηλεκτρόδιο
Αναφοράς
(πρότυπο
ηλεκτρόδιο
υδρογόνου)

Ελάττωση ισχύος
ως αναγωγικοί
παράγοντες

5



ΕΞΙΣΩΣΗ NERST

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K =$$

$$E^0 + \frac{0.0592}{n} \log \frac{(\text{γινόμενο ενεργότητας οξειδωμένων ειδών})}{(\text{γινόμενο ενεργότητας αναγωγμένων ειδών})}$$

όπου

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

- Η εξίσωση δίνει το δυναμικό (E) της ημι-αντίδρασης αναγωγής:



Όπου R η σταθερά αερίων και T η θερμ/σία σε βαθμούς Kelvin



ΣΧΕΣΗ Eh-Kc – pH-διαγράμματα pH Eh

$$Eh = E_o + \frac{0.059}{n} \log K_c$$

Έστω η αντίδραση οξείδωσης του σιδήρου:



με $E_o = -0.083$ V:

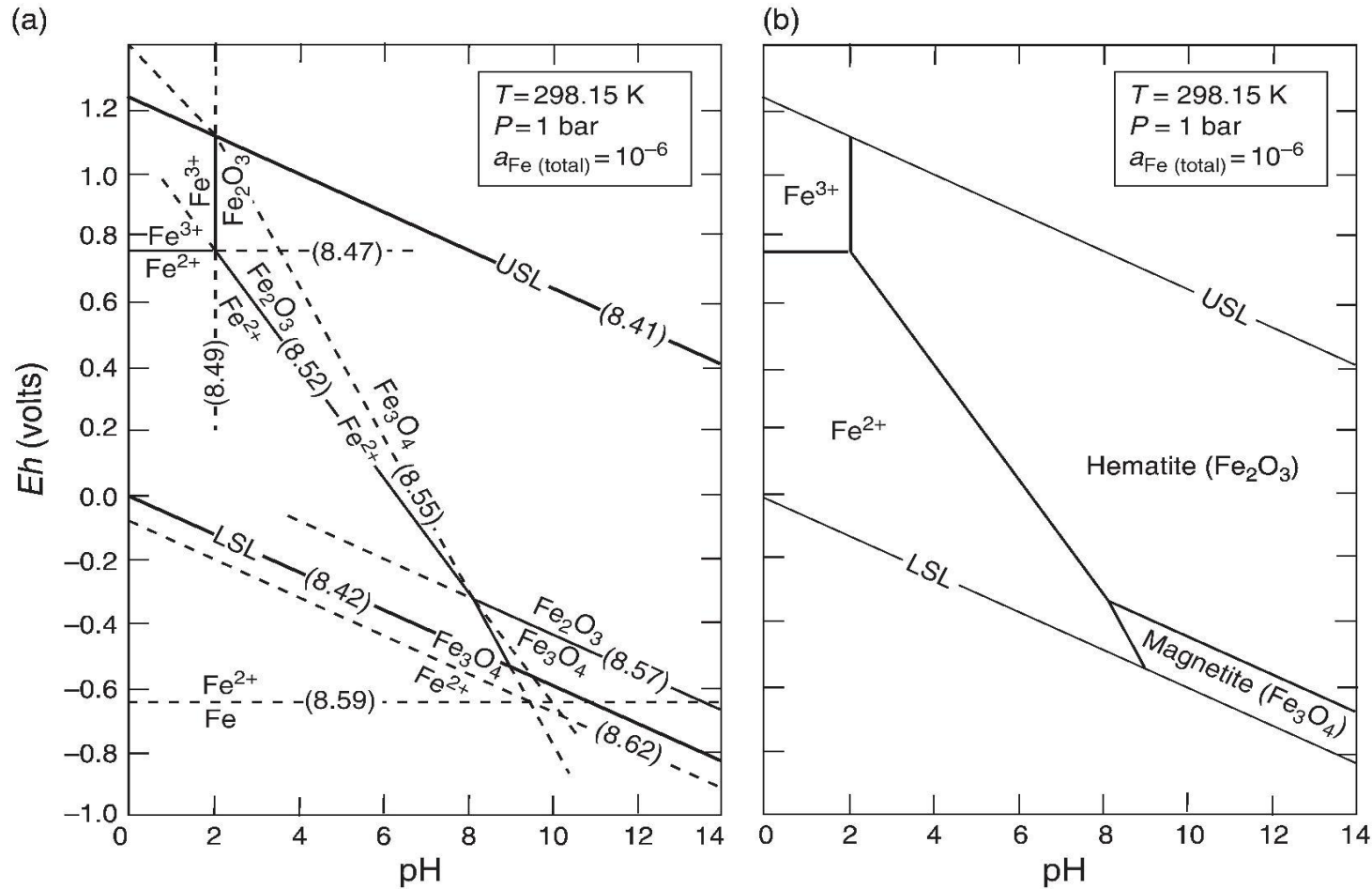
$$Eh = E_o + \frac{0.059}{n} \log K_c \Leftrightarrow$$

$$Eh = -0.083 + \frac{0.059}{8} \log \frac{[Fe_3O_4][H^+]^8}{[Fe]^3[H_2O]^4} \Leftrightarrow$$

$$Eh = -0.083 - 0.0592pH$$



Διάγραμμα Eh- pH για τα είδη του Fe

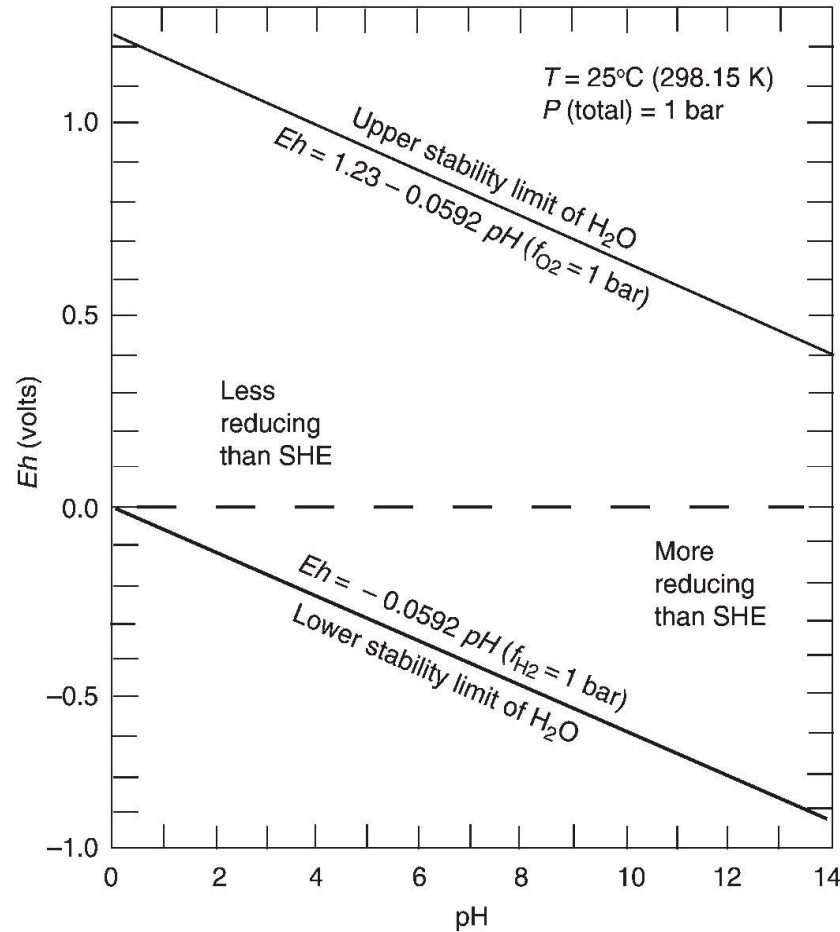


Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition. Kula C. Misra.
© 2012 Kula C. Misra. Published 2012 by Blackwell Publishing Ltd.

6



Διάγραμμα Eh-pH – όρια σταθερότητας του H₂O



Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition. Kula C. Misra.
© 2012 Kula C. Misra. Published 2012 by Blackwell Publishing Ltd.

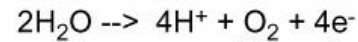
7



Οξειδωτικό περιβάλλον

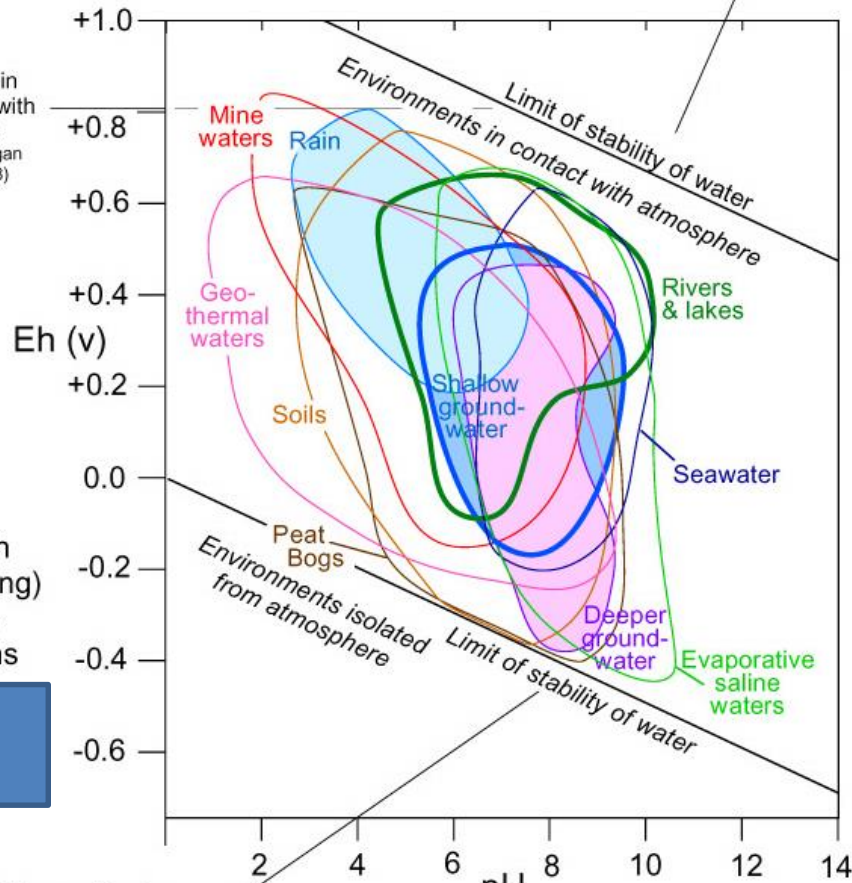
e⁻-robbing oxidizing environments

Breakdown of water:



O₂ is oxidized oxygen, relative to the much more abundant O²⁻ of H₂O and minerals.

Eh of water in equilibrium with atmosphere (Stumm & Morgan 3rd edn., p. 468)



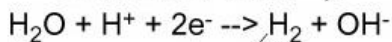
H⁺-rich (H⁺-doning) acidic solutions

Όξινο περιβάλλον

H⁺-poor (H⁺-robbing) alkaline solutions

Αλκαλικό περιβάλλον

Breakdown of water:



Note that H₂ (reduced hydrogen, relative to the much more abundant H⁺) is found in small concentrations in some deeper groundwaters (Lovley & Chapelle 1995, *Reviews in Geophysics*).

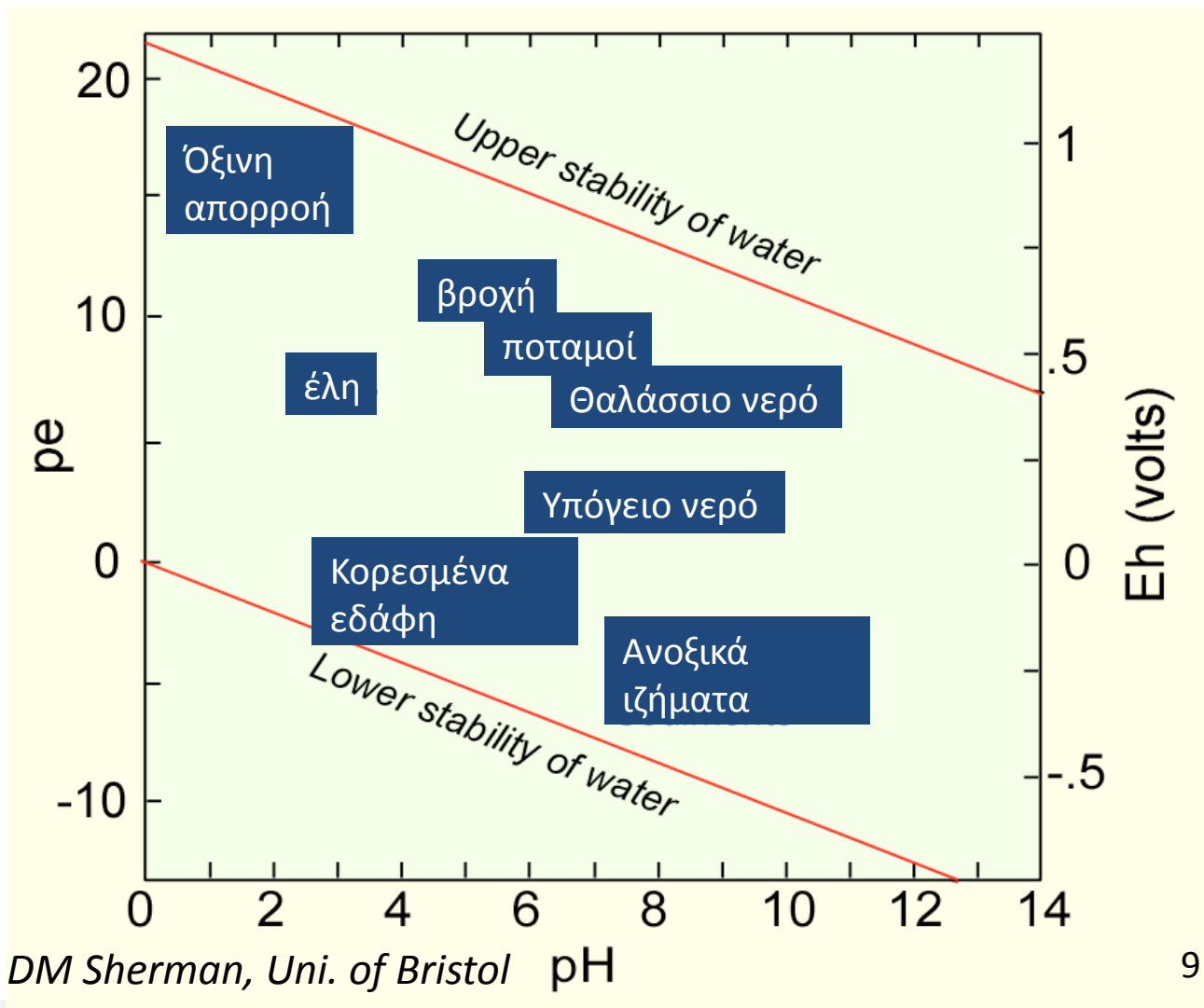
e⁻-doning

Αναγωγικό περιβάλλον

Fields on this diagram are from Figures 4 to 19 of Baas-Becking et al. (1960, *Jo. Geol.* 68:243-284). The fields are thus more data-based than the labels on the widely reproduced Figure 11.1 of Garrels and Christ's *Solutions, Minerals, and Equilibria*.



Πεδία σταθερότητας pe-pH φυσικών νερών



Πηγή: DM Sherman, Uni. of Bristol pH

9



Γιατί η οξείδωση οδηγεί σε ελάττωση του pH;

1. Οξείδωση \rightarrow απομάκρυνση e^- και αύξηση του σθένους.
2. Ελάττωση ακτίνας ιόντων.
3. Άρα $\gg z/r$ (ιοντικό δυναμικό)
4. Υψηλό ιοντικό δυναμικό \rightarrow έλξη ηλεκτραρνητικών συμπλοκοποιητών.
5. O^{2-} το πλέον άφθονο τέτοιο ιόν.
6. Άρα τα πλέον οξειδωμένα ιόντα έλκουν το O του H_2O ή του OH^- .
7. Αντίστοιχα απωθούν τα H^+ .
8. Αύξηση των H^+ οδηγεί σε ελάττωση του pH.

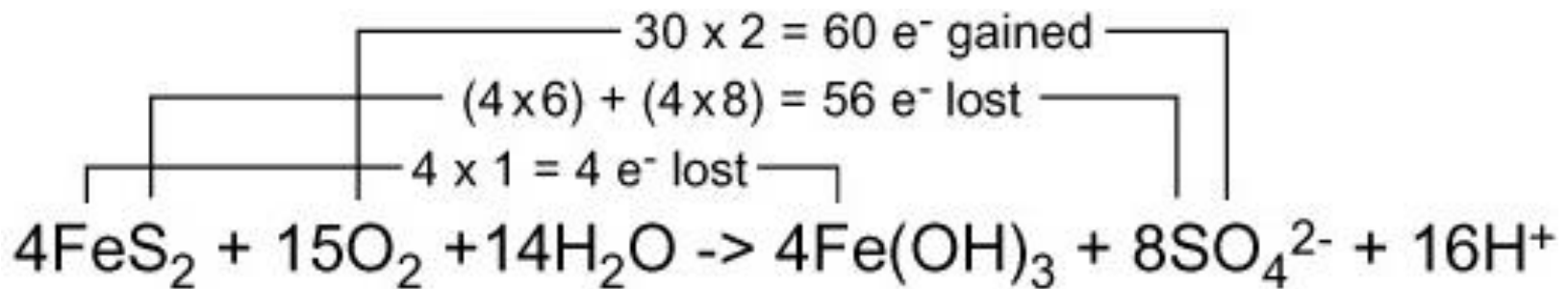
Carbon	Sulfur	Nitrogen
$C^{4-} \rightarrow C^{4+}$ (oxidation of methane)	$S^{2-} \rightarrow S^{6+}$ (oxidation of sulfides)	$N^{3-} \rightarrow N^{5+}$ (oxidation of ammonia)
$C^0 \rightarrow C^{4+}$ (e.g., biological respiration, or oxidation of plant matter or petroleum)	$S^{4+} \rightarrow S^{6+}$ (oxidation of SO_2)	$N^{4+} \rightarrow N^{5+}$ (oxidation of NO_2)
Radii: $C^{4-} = 2.60\text{\AA}$ $C^0 = 0.77\text{\AA}$ $C^{4+} = 0.15\text{\AA}$	$S^{2-} = 1.84\text{\AA}$ $S^{4+} = 0.37\text{\AA}$ $S^{6+} = 0.29\text{\AA}$	$N^{3-} = 1.71\text{\AA}$ $N^{5+} = 0.11\text{\AA}$
Ionic potential or density of charge = $\frac{\text{charge of ion}}{\text{radius of ion}} = \frac{z}{r}$		
$\frac{z}{r} = \frac{4}{0.15} = 27$	$\frac{z}{r} = \frac{6}{0.29} = 21$	$\frac{z}{r} = \frac{5}{0.11} = 45$
$n \quad CH_4 + 2O_2 \rightarrow H_2CO_3 + H_2O$ $NH_3 + 2O_2 \rightarrow HNO_3 + H_2O$ $H_2S + 2O_2 \rightarrow H_2SO_4$ $SO_2 + 2OH^0 \rightarrow H_2SO_4$		
<p>$H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + H^+$</p>	<p>$H_2SO_4 \rightarrow SO_4^{2-} + 2H^+$</p>	<p>$HNO_3 \rightarrow NO_3^- + H^+$</p>

10



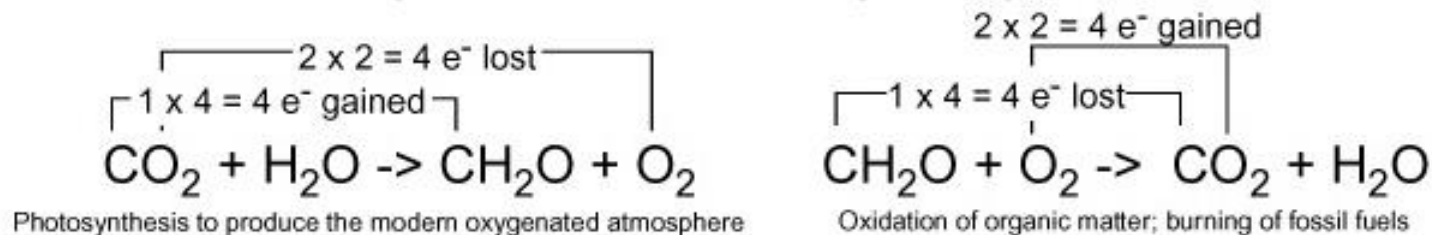
Σημαντικές βιο-γεωχημικές οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις

1. Οξείδωση σιδηροπυρίτη → όξινη απορροή ! Καταλυτική δράση μικροοργανισμών



2. Φωτοσύνθεση- οξείδωση οργανικής ύλης → μεταβολισμός οργανισμών

* Because photosynthesis produces CH_2O (generic organic matter) and O_2 , a lot of natural redox chemistry can be viewed as undoing photosynthesis.

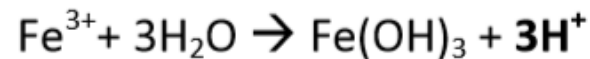
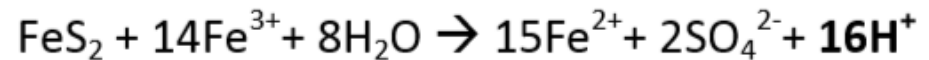
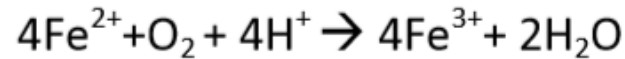
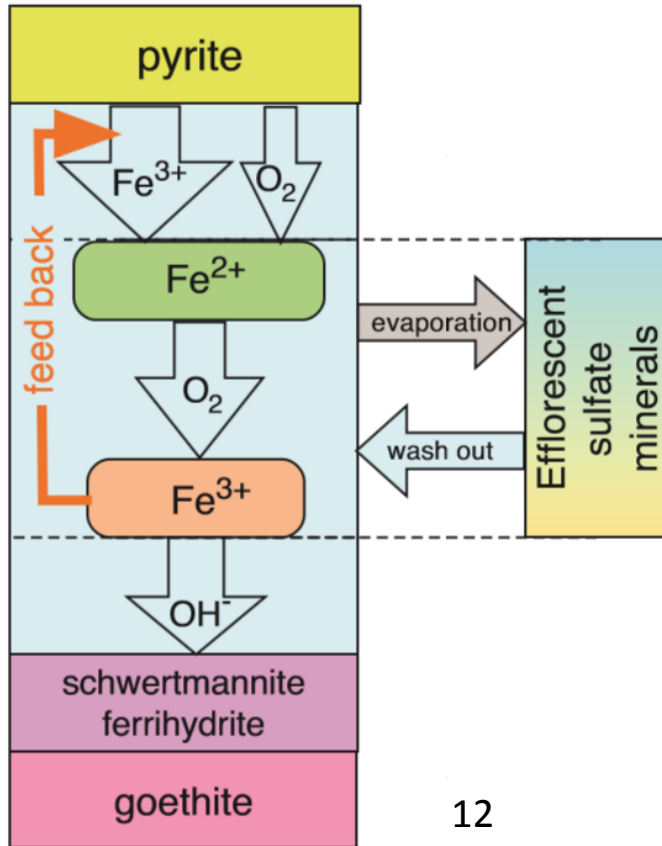


11

LBR 8150 RedoxReview 06 rev 10/2006



Σταδιακή οξείδωση σιδηροπυρίτη σε περιβάλλον όξινης απορροής



12

(Elements, April 2014)

Οξείδωση οργανικής ύλης – αεροβικός/αναερόβιος μεταβολισμός

	Συλλέκτης e-	Αντίδραση οξείδωσης οργανικής ύλης	Relative yield of energy	Characteristic H ₂ concentration (nM) in solution
1	O ⁰ in O ₂	CH ₂ O + O ₂ --> CO ₂ + H ₂ O	100	0
Αερόβιες συνθήκες Αναερόβιες συνθήκες		----- Carbonic acid (H ₂ CO ₃) -----		
2	N ⁵⁺ in NO ₃ ⁻	5CH ₂ O + 4NO ₃ ⁻ --> 4HCO ₃ ⁻ + 2N ₂ + CO ₂ + 3H ₂ O	93	<0.1
3	N ⁵⁺ in NO ₃ ⁻	2CH ₂ O + NO ₃ ⁻ + H ₂ O --> 2HCO ₃ ⁻ + NH ₄ ⁺		
4	Mn ⁴⁺ in MnO ₂	CH ₂ O + 3CO ₂ + H ₂ O + 2MnO ₂ --> 2Mn ²⁺ + 4HCO ₃ ⁻	87	<0.1
5	Fe ³⁺ in Fe(OH) ₃	CH ₂ O + 7CO ₂ + 4Fe(OH) ₃ --> 4Fe ²⁺ + 8HCO ₃ ⁻ + 3H ₂ O	84	0-0.5
6	S ⁶⁺ in SO ₄ ²⁻	2CH ₂ O + SO ₄ ²⁻ --> H ₂ S + 2HCO ₃ ⁻	6	1-2
7	C ⁰ in CH ₂ O	2CH ₂ O --> CH ₄ + CO ₂ (Methanogenesis)	3	5-10

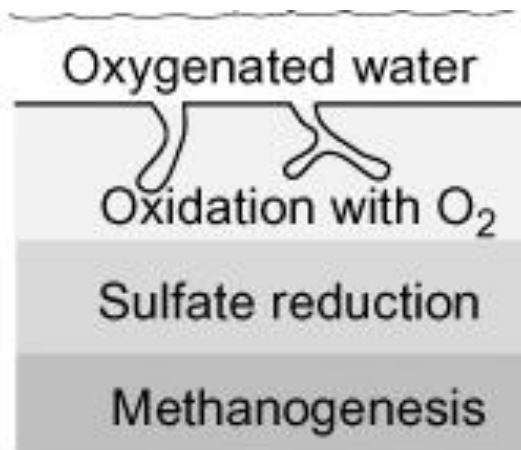
Fe²⁺ and S²⁻ for formation of pyrite

Reactions that produce bicarbonate (HCO₃⁻)

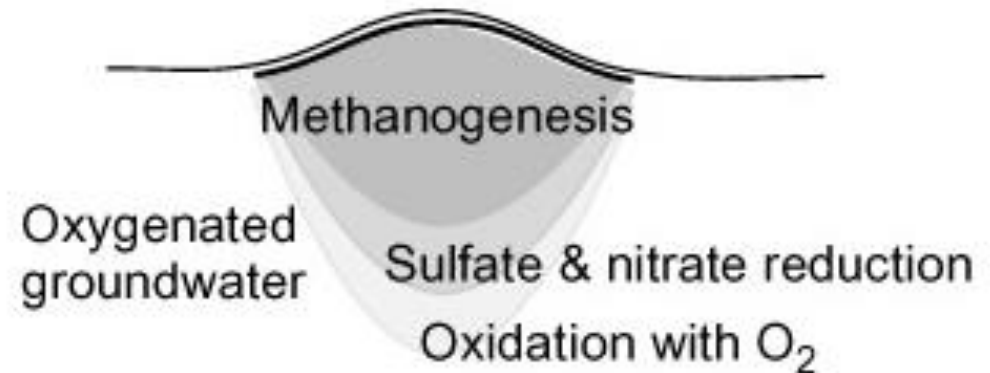


Εξέλιξη αντιδράσεων σε περιβάλλοντα πλούσια σε οργανικό υλικό και φτωχά σε οξυγόνο

Ιζήματα

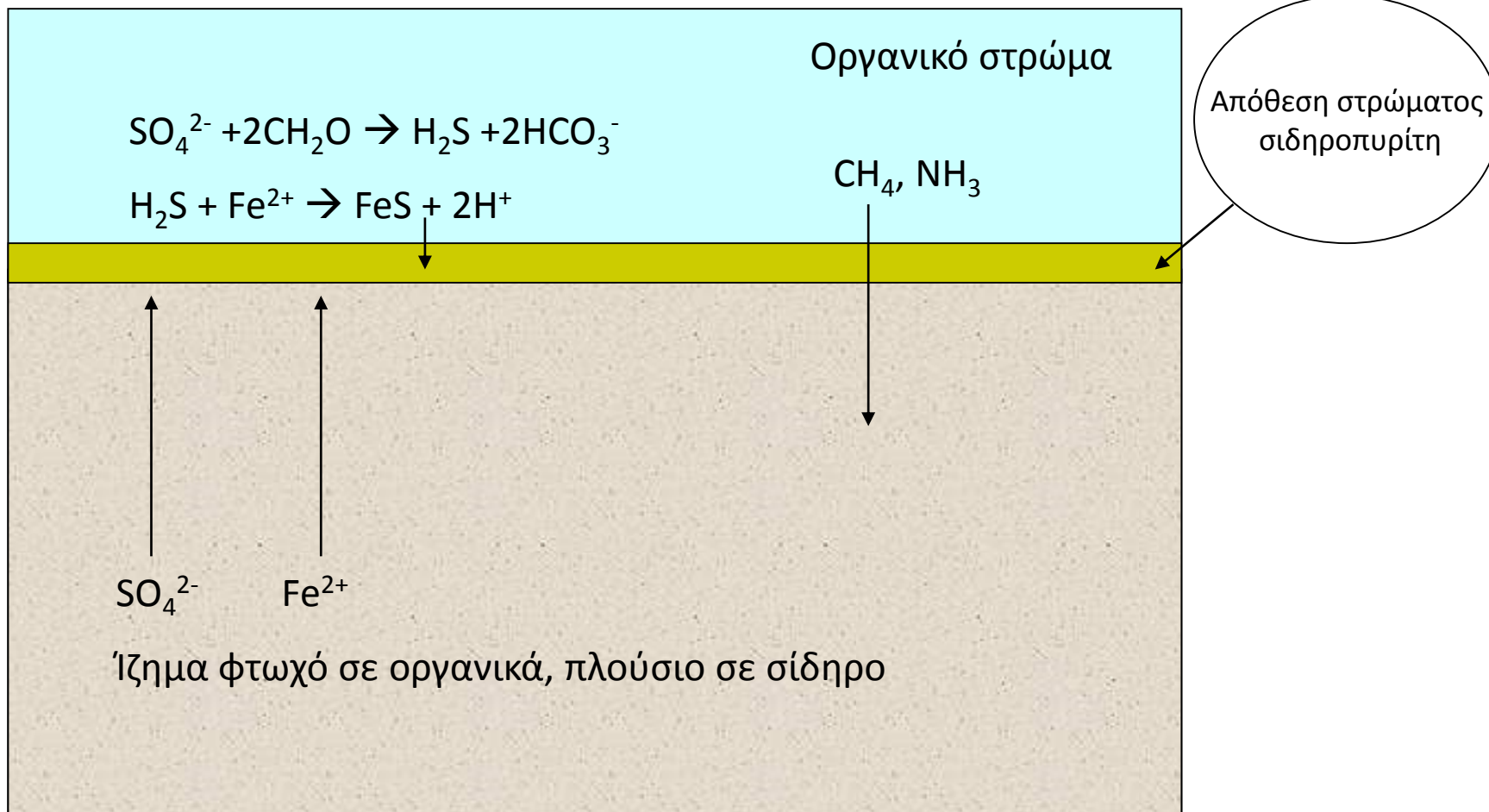


ΧΥΤΑ

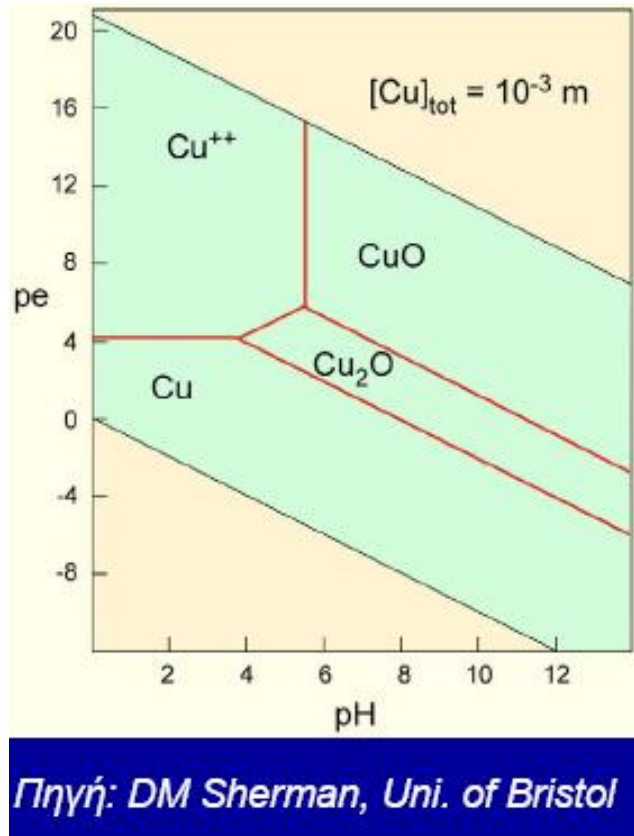


ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΠΥΡΙΤΗ ΜΕ ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΓΕΝΕΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΙΖΗΜΑΤΩΝ

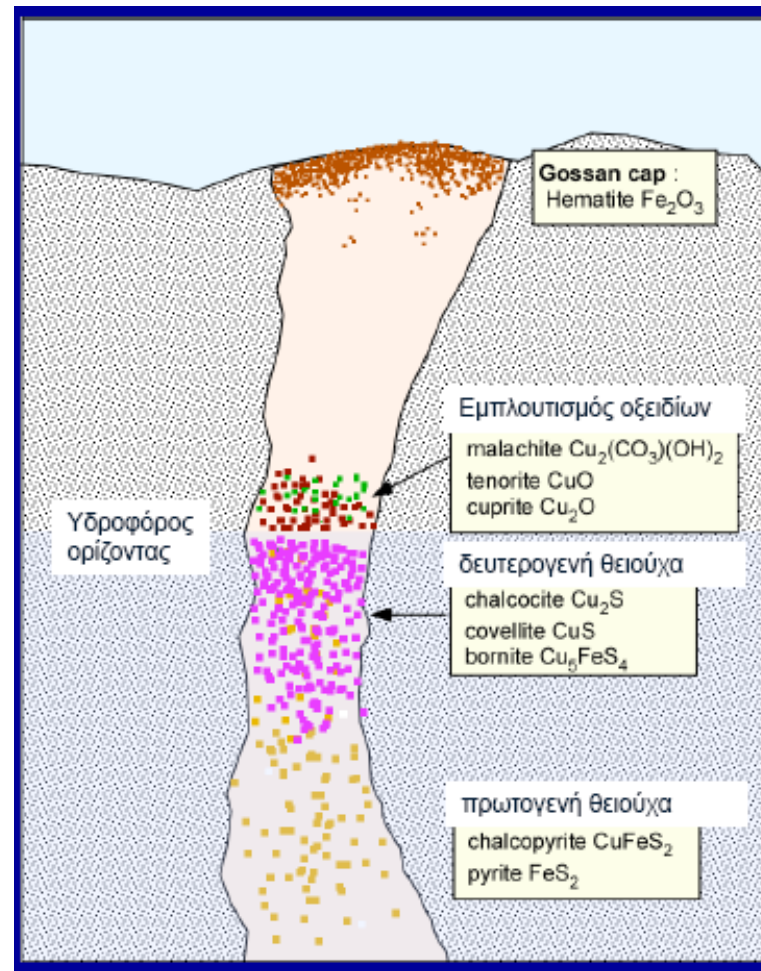
- Μοντέλο Berner



Υπεργενετικός εμπλουτισμός Cu με δράση όξινων διαλυμάτων



13



14



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αριάδνη Αργυράκη 2015. Αριάδνη Αργυράκη. «Γεωχημεία. Γεωχημικές διεργασίες στην επιφάνεια της γης». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL2/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (1/3)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

Εικόνα 1: Μεταβολή διαλυτότητας ανάλογα με το οξειδωτικό σθένος. Copyright L. Bruce Railsback, Department of Geology, University of Georgia, Athens, Georgia 30602-2501 U.S.A. Σύνδεσμος:

<http://www.gly.uga.edu/railsback/FundamentalsIndex.html>. Πηγή:
www.gly.uga.edu

Εικόνα 2: Οξειδοαναγωγή και περιοδικός πίνακας. Copyright L. Bruce Railsback, Department of Geology, University of Georgia, Athens, Georgia 30602-2501 U.S.A. Σύνδεσμος: <http://www.gly.uga.edu/railsback/FundamentalsIndex.html>. Πηγή:
www.gly.uga.edu

Εικόνα 5: Copyrighted. Πηγή: Robie and Hemmingway (1995).



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/3)

Εικόνα 6: Διάγραμμα Eh- pH για τα είδη του Fe. Copyright 2012 Kula C. Misra. Πηγή: Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition, Kula C. Misra.

Εικόνα 7: Διάγραμμα Eh-pH – όρια σταθερότητας του H₂O. Copyright 2012 Kula C. Misra. Πηγή: Introduction to Geochemistry: Principles and Applications, First Edition, Kula C. Misra.

Εικόνα 8: Characterization of solutions by pH and Eh. Copyright L. Bruce Railsback, Department of Geology, University of Georgia, Athens, Georgia 30602-2501 U.S.A. Σύνδεσμος:

<http://www.gly.uga.edu/railsback/Fundamentals/8150RedoxPlot07LS.jpg>. Πηγή: www.gly.uga.edu

Εικόνα 9: Πεδία σταθερότητας pe-pH φυσικών νερών. Copyrighted. Πηγή: Πηγή: DM Sherman, Uni. of Bristol.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (3/3)

Εικόνα 10: Copyrighted.

Εικόνα 11: Copyrighted. Πηγή: LBR 8150 RedoxReview 06 rev 10/2006.

Εικόνα 12: Copyrighted. Πηγή: Elements, April 2014

Εικόνα 13: Copyrighted. Πηγή: DM Sherman, Uni. Of Bristol.

Εικόνα 14: Copyrighted. Πηγή: DM Sherman, Uni. Of Bristol.

