جيوكيمياء الرواسب المعدنية

محمد بن أحمد قزاز

أستاذ الجيوكيمياء – كلية علوم الأرض – جامعة الملك عبدالعزيز

مركز النشر العلمي
جامعة الملك عبد العزيز
ص.ب ١٨٠٢٠٠ - جدة ٢١٥٨٩
المملكة العربية السعودية

© جامعة الملك عبد العزيز ١٤٢٧ هـ(٢٠٠٦م)

جميع حقوق الطبع محفوظة .

الطبعة الأولى : ١٤٢٧هـ(٢٠٠٦م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

قزاز ، محمد بن احمد

جيوكيمياء الرواسب المعدنية / محمد بن احمد قزاز -جدة ،

١٤٢٦هـ

٣٤٤ ص ؛ سم

ردمك : ٢-٤٤٩-٠٦-٩٩٦٠

١ -كيمياء الأرض ٢-كيمياء التربة أ- العنوان

ديوي ٥٥١,٩ ١٤٢٦/٧٣٥٩

رقم الإيداع : ١٤٢٦/٧٣٥٩

ردمك : ٢-٤٤٩-٠٦-٩٩٦٠

مطابع جامعة الملك عبد العزيز

تقديم

تطور علم الجيوكيمياء في السنوات الأخيرة تطوراً كبيرا حتى أصبح جزءاً لايمكن الاستغناء عنه في الدراسات المتعلقة بعلم الأرض. من أهم هذه الدراسات تلك التي تبحث عن العمليات التي تقود إلى نشأة وتجمع الخامات الاقتصادية في باطن الأرض. وكلنا يدرك مدى أهمية هذا النوع من الثروات الطبيعية التي حبانا الله إياها للاستفادة منها في مختلف أنواع الصناعات التي تخدم البشرية في جميع مجالات حياتها.

ونظرا لما لمسته أثناء قيامي بتدريس الجيولوجيا في كلية علوم الأرض بجامعة الملك عبد العزيز وخاصة المواد التخصصية منها مثل مادة جيوكيمياء الرواسب المعدنية من افتقار المكتبة العربية لمراجع باللغة العربية في هذا المجال وصعوبة استيعاب طلابنا العرب لهذا التخصص أثناء قرائتهم لمختلف مواضيعه في المراجع المكتوبة بلغات غير لغتهم الأم، بدأت التفكير في إعداد هذا المرجع، لا لأن يكون بديلا عن المراجع الأخرى ولكن ليكون عونا للطالب العربي والمشتغلين في مجالات الخامات الاقتصادية والتعدين لفهم واستيعاب العمليات الكيميائية التي تقود إلى تكون رواسب الخامات الاقتصادية في باطن الأرض أو على سطحها. وقد استعنت أثناء إعدادي لهذا المرجع بأهم وأحدث المراجع العلمية المتوفرة حاليا على الساحة العلمية.

حرصت أثناء قيامي بإعداد الإطار العام لهذا المرجع، أن أبدأ فصول الكتاب بفصل أعرض فيه نبذة عن الأسس الجيوكيميائية ذات العلاقة بحركة العناصر في باطن الأرض أو على السطح والعوامل الكيميائية التي تتحكم في هذه الحركة. وكما سوف يلاحظ القارئ يتناول هذا الفصل عرضا موجزا للنظائر المستقرة وذلك لما لهذا الموضوع من أهمية في تفسير كثير من المواضيع ذات العلاقة بنشأة ومصادر رواسب الخامات.

يستعرض الفصل الثاني أنواع رواسب الخامات الاقتصادية التي تتكون في باطن الأرض أو على السطح والتي تم تصنيفها تبعا للعمليات الجيولوجية التي تتسبب في نشأتها

وهذه الأنواع هي كما يلي: رواسب الخامات الصهارية، رواسب الخامات الحرمائية، رواسب الخامات المتحولة، رواسب الخامات الرسوبية والرواسب المعدنية البحرية.

خصص الفصل الثالث لتقديم نماذج لبعض رواسب الخامات لكي يتعرف الطالب من خلال هذا التقديم على الطريقة التي تتم بها مناقشة نشأة رواسب الخامات والعوامل الكيميائية التي تؤثر على هذه النشأة. واختيرت لهذه النماذج أهم أنواع رواسب الخامات التي توجد في الطبيعة مثل: رواسب الحديد، رواسب النحاس، رواسب الرصاص- زنك، رواسب الألومنيوم، رواسب النيكل، رواسب اليورانيوم ورواسب المنجنيز.

أما في الفصل الرابع والأخير فقد حرصت على التعرض إلى العلاقة المهمة بين الخامات الاقتصادية والبيئة من حولها وأهم التفاعلات الكيميائية التي تتم بين مكونات البيئة ومكونات هذه الخامات ونواتج مثل هذه التفاعلات، وتأثير هذه النواتج على الحياة القائمة على الأرض.

وأخيراً آمل أن أكون قد قدمت بهذا العمل المتواضع للمكتبة العربية مايثريها وأن يجد الطالب العربي الدارس في مجالات علوم الأرض في هذا العمل الفائدة المرجوة.

والله من وراء القصد.

جدة: رجب من عام ١٤٢٥

الموافق: سبتمبر من عام ٢٠٠٤

المؤلف

محمد بن أحمد عبدالرحمن قزاز

المحتويات

صفحة

تقديم..... هـ

قائمة الجداول..... س

قائمة الأشكال..... ص

الفصل الأول: مفاهيم أساسية

البيئات الجيوكيميائية..... 3

الحركية الجيوكيميائية 4

حركة العناصر في البيئات العميقة 5

حركة العناصر في البيئات السطحية 9

الجهد الأيوني 11

جهد الأكسدة والاختزال 13

معامل الحمضية 18

منحنيات الاتزان 22

النظائر 24

النظائر المستقرة 24

المعاني المعتمدة لقيم دلتا 26

نظائر الأكسجين والهيدروجين 26

نظائر الكربون 28

نظائر الكبريت 30

الأيونات المركبة..... 33

الأواصر المهمة جيولوجيا 34

صف

الضوابط الكيميائية التي تحكم تكون الأيونات المركبة 34
علاقات اتزان الأواصر المهمة..... 39
الشاذات الجيوكيميائية 41
مراجع المفاهيم الأساسية 43

الفصل الثاني: أنواع رواسب الخامات

رواسب الخامات الصهارية 49
تولد الصهارات وتمايز العناصر 50
رواسب الكبريتيدات الصهارية 51
التركيب الكيميائي 54
تصرف الكبريت في الصهارة 55
المحقونات النارية الجوفية ورواسب الخامات 57
الصخور المصدر 58
مراجع رواسب الخامات الصهارية 62

رواسب الخامات الحرمائية 65
المحاليل الحرمائية 65
تصنيف الأنظمة الحرارية 65
الأنظمة المخزنة 66
الأنظمة الدورية 66
مصادر المحاليل الحرمائية 66
حركة المحاليل الحرمائية 71

صفحة

التركيب الكيميائي للمحاليل الحرمائية 72
مصادر المواد الذائبة في المحاليل الحرمائية 75
العوامل التي تقود إلى ترسب خامات الفلزات 76
مراجع رواسب الخامات الحرمائية 82

رواسب الخامات المتحولة 87
التميؤ 89
انتزاع الماء 89
انتزاع الكربون 90
الأكسدة والاختزال 90
نواتج التحولات الحرمائية في الصخور النارية 92
نطاقات التحول في صخر جرانيتي 92
النطاق البوتاسي 93
النطاق السريسيتي 95
النطاق الأرجيلي المتقدم 96
النطاق الأرجيلي المتوسط 96
النطاق البروبيليتي 96
نواتج التحولات النارية في الصخور الكربوناتية 98
سكارن 99
تصنيف الـــ سكارنات 102
تصنيف الـــ سكارن تبعا لعلاقته بالصخور النارية..... 102
سكارن خارجي "إكزوســكارن" 103

صفحة

سكارن داخلي "إندوســكارن" 104
تصنيف الــ سكارن تبعا لنوعية فلزات الخامات المصاحبة 107
سكارنات الحديد 107
سكارنات الذهب 108
سكارنات التنجستن 111
سكارنات النحاس 112
سكارنات الزنك 113
سكارنات الموليبدنوم 114
سكارنات القصدير 115
مراجع رواسب الخامات المتحولة 118

رواسب الخامات الرسوبية 125
التجوية الفيزيائية (الميكانيكية)..... 125
التجوية الكيميائية 126
دور عمليات التجوية في نشأة الخامات الاقتصادية 128
دور الكائنات الحية 130
أشكال الخامات الرسوبية 131
الدراسات الجيوكيميائية لرواسب الخامات الرسوبية 132
النظائر المستقرة في الخامات الرسوبية 132
مراجع رواسب الخامات الرسوبية 133

الرواسب المعدنية البحرية 135
أنواع الرواسب المعدنية البحرية 135

صفحة

مكيثات بحرية 136
البيئات الترسيبية للرواسب المكيثة 137
رواسب الأكاسيد 138
الرواسب المعدنية الحرمائية تحت البحرية 138
رواسب حدود الألواح المتباعدة 140
رواسب البحر الأحمر 145
النشاط الحرمائي في قاع البحر الأحمر 145
مراجع الرواسب المعدنية البحرية 153

الفصل الثالث: أمثلة لبعض رواسب الخامات

رواسب الحديد 161
رواسب الحديد الصهارية 162
رواسب خامات الحديد الرسوبية 164
تصنيف متكونات الحديد 165
مصادر الحديد 166
جيوكيمياء الحديد 167
الأكاسيد 168
الكبريتيدات والكربونات 170
السيليكات 174
مصادر السيليكا 176
معادن الحديد المتحولة 177

صفحة

مراجع رواسب الحديد 178

رواســب النحاس..... 181
معادن النحاس 182
جيوكيمياء النحاس 183
تركيزات النحاس السطحية 185
أمثلة لرواسب النحاس 189
رواسب النحاس في جبل صايد 190
رواسب النحاس في ميشيجن 190
رواسب النحاس في كريتا، بأكلاهوما 192
رواسب النحاس في متكونات الطفلة لشمال أوروبا والمعروفة بالكوبفرشيفر ... 195
مراجع رواسب النحاس 197

رواســب الرصاص والزنك 201
رواسب الرصاص والزنك في الصخور الكربوناتية 204
رواسب الرصاص – زنك في متكونات الطفلة 209
مراجع رواسب الرصاص والزنك 211

رواسب الألومنيوم 217
التركيب المعدني للبوكسيت 219
السمات الجيوكيميائية 224
تصنيف رواسب البوكسيت 231
الخصائص الصخرية 232
التكوين النطاقي لرواسب البوكسيت 233

صفحة

رواسب الألومنيوم في المملكة 235
مراجع رواسب الألومنيوم 236

رواسب النيكل 239
لاتيريت النيكل 242
جيوكيمياء النيكل 247
نظريات النشأة 252
مراجع رواسب النيكل 255

رواسب اليورانيوم 259
اليورانيوم في الصخور النارية 259
اليورانيوم في الصخور الرسوبية 262
أنماط حركية اليورانيوم في البيئات الجيولوجية 252
ميكانيكية الترسيب 269
أمثلة لرواسب اليورانيوم 274
رواسب اليورانيوم القديمة 274
رواسب العروق غير المتوافقة 276
التحلل الإشعاعي لليورانيوم 278
مراجع رواسب اليورانيوم 281

رواسب المنجنيز 285
معادن المنجنيز 287
جيوكيمياء المنجنيز 290

صفحة

عقد المنجنيز 297
العوامل الكيميائية والمعدنية 298
مراجع رواسب المنجنيز 300

الفصل الرابع: الرواسب المعدنية والبيئة

الخامات الكبريتيدية والبيئة 305
الأسس الكيميائية لمعادلة الأحماض 309
التأثيرات البيئية لبعض الفلزات 310
الزئبق 310
الكادميوم 312
الزرنيخ 313
المواد المشعة 315
مراجع الرواسب المعدنية والبيئة 316

العناصر الكيميائية 317

ثبت المصطلحات 321
عربي – إنجليزي 321
إنجليزي – عربي 327

كشاف الموضوعات 331

قائمة الجداول

صفحة

الفصل الأول

الجدول 1-1 : دالة الإحلال الأيوني للكاتيونات الشائعة 8

الجدول 1-2: جهود الأكسدة (E^0) لبعض العناصر المهمة جيولوجيا 15

الجدول 1- 3 : تصنيف الفلزات والأواصر المهمة جيولوجيا 36

الفصل الثاني

الجدول 2-1: التركيب الكيميائى لعينات من المكتنفات المائعة ومحاليل حرمائية حديثة ... 74

الجدول 2-2: خصائص الأنواع الرئيسة من ألـــ سكارن 116

الجدول 2-3: التركيب الكيميائي لماء المزن (الماء الأجاج) وماء البحر في منطقة اتلانتس II بالبحر الأحمر 149

الجدول 2-4: تصنيف معادن الطين المتمعدن المستخرج من منطقة أتلانتس II بقاع البحر الأحمر تبعا للتركيب المعدني 150

الفصل الثالث

الجدول 3-1: تركيزات الحديد في الصخور الشائعة والمياه الطبيعية 162

الجدول 3-2: أهم معادن سيليكات الحديد وأهم خواصها الصخرية 174

الجدول 3-3: تركيزات النحاس في معظم المواد الجيولوجية 181

الجدول 3-4: تركيزات الرصاص والزنك في بعض الصخور والمياه الطبيعية 203

الجدول 3-5: $\delta\ ^{34}S$ للجالينا والاسفاليريت من خامات للرصاص والزنك في صخور كربوناتية..... 211

صفحة

الجدول 3-6: تركيزات الألومنيوم في الصخور الشائعة والمياه الطبيعية 217

الجدول 3-7: معادن الألومنيوم الشائعة 220

الجدول 3-8: مقارنة التركيب الكيميائي لبعض رواسب البوكسيت بتركيب الصخور التي توجد أسفل منها 225

الجدول 3-9: تركيزات النيكل في الصخور الشائعة والمياه الطبيعية 240

الجدول 3-10: أهم معادن سيليكات المغنسيوم- نيكل الشائعة في ترب لاتيريت النيكل 241

الجدول 3-11: تحاليل كيميائية للمعادن الحاملة للنيكل في لاتيريتات النيكل 246

الجدول 3-12: قطاع كيميائي للاتيريتات نيكل من نيوكاليدونيا 248

الجدول 3-13: معدلات تركيز اليورانيوم والثوريوم في الصخور الشائعة والمياه الطبيعية 261

الجدول 3-14: قائمة بالأيونات المركبة التي يكونها اليورانيوم مع بعض الأواصر ligands 265

الجدول 3-15: سلسلة التحلل الإشعاعي لليورانيوم – 235 278

الجدول 3-16: سلسلة التحلل الإشعاعي لليورانيوم – 238 279

الجدول 3-17: تركيزات المنجنيز في الصخور الشائعة ومياه البحر 286

الجدول 3-18: معادن المنجنيز التي يمكن العثور عليها في خاماته 288

الجدول 3-19: متوسطات التركيب الكيميائي لبعض معادن المنجنيز غير المتحولة والمتحولة من مناطق مختلفة 289

صفحة

الجدول 3-20: تركيب معادن كربونات منجنيز الرسوبيات الحديثة من بيئات مختلفة 290

الجدول 3-21: التركيب الكيميائي لعينات من عقد المنجنيز المجمعة من المحيط الأطلنطي والمحيط الباسيفيكي 299

الجدول 3-22: العناصر الثانوية في عينات عقد المنجنيز من المحيط الأطلنطي والمحيط الباسيفيكي. النسب الكلية للعناصر µg/g 299

الجدول 4-1: نسب أشكال اليورانيوم في المواد الطبيعية 315

قائمة الأشكال

الفصل الأول **صفحة**

الشكل 1-1: الجهد الأيوني لأيونات العناصر المختلفة 12

الشكل 1-2: ذوبانية النحاس تبعا لتغير جهد الأكسدة الـ Eh 18

الشكل 1-3: ذوبانية النحاس Cu^{2+} كمتغير أمام معامل الحمضية الـ "pH" 21

الشكل 1-4: الموقع التقريبي لحقول بعض البيئات الطبيعية تبعا للعلاقة بين معاملي الأكسدة الـ Eh والحمضية الـ pH 23

الشكل 1-5: نظائر الأكسجين في المواد الجيولوجية والفضائية 27

الشكل 1- 6: نظائر الكربون في الأنظمة الجيولوجية 29

الشكل 1-7: نظائر الكبريت في الأنظمة الجيولوجية 31

الشكل 1-8: العلاقة بين الجهد الأيوني Z/r والسالبية الكهربية لبعض أيونات الفلزات الانتقالية 38

الشكل 1-9: علاقات الاتزان لأشكال الكربون، النيتروجين، الفوسفور والكبريت في البيئات الجيوكيميائية المختلفة.(عن Brookins, 1988) 40

الشكل 1-10: منحنى يبين مستوى النمط المحلي والإقليمي والشاذة الجيوكيميائية 42

الشكل 1-11: شاذة لعناصر في بيئة مجاورة لمنطقة متمعدنة 43

الفصل الثاني

الشكل 2-1: (أ) قطاع يبين التدرج الرأسي للرواسب الكبريتيدية الصهارية من كبريتيدات منثورة في المستويات العلوية من الصخور إلى كبريتيدات كتلية في الأسفل. (ب) رسم تخطيطي صمم لتوضيح كيفية وجود الخامات الكبريتيدية في معقد السودبري Sudbury Complex في كندا 53

صفحة

الشكل 2-2: نظائر الهيدروجين مقابل نظائر الأكسجين في عينات من المحاليل الحرمائية لعدد من رواسب الخامات 70

الشكل 2-3: الكفاءة المئوية لانفصال النحاس من الصهارة الفلسية في المحاليل المائية.... 73

الشكل 2-4: نطاقات التحولات النارية حول رواسب للنحاس البورفيري في جسم جرانيتي 94

الشكل 2-5: التغيرات الحرمائية تبعا للطبيعة الكيميائية للمحاليل ودرجة الحرارة 98

الشكل 2-6: مقطع يوضح نطاقات الـ سكارن المحتملة حول محقون ناري في صخور جيرية 102

الشكل 2-7: علاقة الـ سكارن بالمحقونات النارية 106

الشكل 2-8: قطاع يوضح بنائية الأفيوليت ومواقع وجود خامات البيريت والكالكوبيرت الكتلية في القطاع 141

الشكل 2-9: البحر الأحمر ومواقع المنخفضات فيه 147

الشكل 2-10: درجة تشبع مياه البحر بالمعادن كمعامل أمام درجة الحرارة 152

الفصل الثالث

الشكل 3-1: نموذج لمصادر الحديد 167

الشكل 3-2: منحنيات الاتزان لأطوار أكاسيد وكربونات وكبريتدات الحديد تبعا للمتغيرين الـ Eh والـ pH 169

الشكل 3-3: منحنى الـ Eh والـ pH لأطوار الحديد المختلفة المتكونة من محاليل تحتوي على سيليكا 175

صفحة

الشكل 3-4: العلاقة بين السيدريت - جرينالیت -والأستلبنوميلان في وجود سيليكا غير متبلورة 177

الشكل 3-5: أشكال النحاس تبعا للمتغيرين الـ Eh والـ pH 183

الشكل 3-6: تأثير الكلور على ذوبانية النحاس 184

الشكل 3-7: ميكانيكية الفصل بين النحاس والحديد تبعا للمتغيرين الـ Eh والـ pH في البيئات الجيوكيميائية 187

الشكل 3-8: دوران الماء في بيئة السبخة 193

الشكل 3-9: مراحل تكون رواسب النحاس في السبخة 194

الشكل 3-10: خامات رصاص – زنك تظهر كعروق، قاطعة لمتكونات من الصخور الجيرية و صخور الطفلة، وكمستويات متداخلة بين مستويات المتكونات الرسوبية 204

الشكل 3-11: مقارنة قيم نظائر الكبريت في رواسب المسيسبي بقيمها في رواسب مختلفة النشأة 208

الشكل 3-12: تصنيف أنواع التربة المتخلفة تبعا لـ Dury,1969 218

الشكل 3-13: علاقة البوهميت والدياسبور، في بوكسيت الكارست، بدرجة الأكسدة، والمعبر عنها في الشكل بأكسيد الحديد Fe_2O_3، ومحتوى التربة من معادن الكاولينيت، والمعبر عنه بأكسيد السيليكون SiO_2 222

الشكل 3-14: التصنيف المعدني والكيميائي لرواسب الحديد والألومنيوم، تبعا لعلاقتها بالمعادن الطينية 223

صفحة

الشكل 3-15: تأثر ذوبانية الجبسيت، $Al(OH)_3$، بمعامل الحمضية pH 227

الشكل 3-16: حقول الثباتية لبعض معادن الألومنيوم وذلك تبعا لنشاط السيليكا في الماء. 228

الشكل 3-17: حقول الثباتية لبعض معادن الألومنيوم في بيئة متعادلة تقريبا (pH=6) وذلك تبعا لنشاط السيليكا والألومنيوم في الماء 229

الشكل 3-18: أنواع المعادن السائدة في بوكسيت الكارست المختلفة الأعمار 230

الشكل 3-19: قطاع رأسي لترب بوكسيتية على صخور لا تحتوي على حديد وأخرى تحتوي على حديد ومتكونة في نفس الظروف من الطقس 235

الشكل 3-20: قطاع معدني للاتيريتات النيكل (مثال من كاليدونيا الجديدة) 242

الشكل 3-21: تركيزات الألومنيوم والنيكل في نطاقي الأكاسيد والسيليكات 244

الشكل 3-22: قطاع كيميائي للاتيريتات نيكل من الفليبين 247

الشكل 3-23: حقول ثباتية أصناف النيكل تبعا للمتغيرين الـ pH والـ Eh 249

الشكل 3-24: العلاقة بين أطوار النيكل الثلاث، الأكاسيد، السيليكات والطور الذائب في المحاليل Ni^{2+} 251

الشكل 3-25: العلاقة بين ثباتية سيليكات النيكل ونشاط السيليكا وقيم الأس الهيدروجيني "pH" في المحاليل الملامسة 253

الشكل 3-26: نمط نشأة لاتيريتات النيكل تبعا للوقت 254

الشكل 3-27: دورة اليورانيوم في البيئات الجيولوجية 263

صفحة

الشكل 3-28: منحنيات انتشار تبين معدل انتشار أيونات اليورانيوم المركبة في محاليل درجة حرارتها 100 °م. وتحتوي على F 10 ppm؛ SO_4^{2-} 100 ppm وواحد وزن جزيئي(1m) NaCl في كل لتر من الماء 266

الشكل 3-29: معدلات انتشار أيونات اليورانيوم المركبة في محاليل درجة حرارتها 100 °م وتحتوي على F 10 ppm؛ SO_4^{2-} 100 ppm، P 0.1 ppm وواحد وزن جزيئي NaCl (1m) في كل لتر من الماء 267

الشكل 3-30: معدلات انتشار أيونات اليورانيوم المركبة في محاليل درجة حرارتها 300 °م وتحتوي على F 100 ppm ؛ SO_4^{2-} 1000 ppm وواحد وزن جزيئي NaCl (1m) في كل لتر من الماء 268

الشكل 3-31: معدلات انتشار أيونات اليورانيوم المركبة في محاليل درجة حرارتها 300 °م وتحتوى على F 10 ppm، SO_4^{2-} 1000 ppm ، P 1ppm وواحد وزن جزيئي NaCl. ضغط ثاني أكسيد الكربون السائد يساوي 10 ضغط جوي 269

الشكل 3-32: ذوبانية اليورانيوم في محاليل مائية تحتوي على ثاني أكسيد الكربون وذلك تبعا لتغير قيم الـ Eh والـ pH 271

الشكل 3-33: علاقة الأطوار بين اليورانينيت والكوفينيت في درجة حرارة 25 °م 272

الشكل 3-34: أطوار اليورانيوم وعلاقتها بدرجات الـ Eh والـ pH في محاليل تحتوى على الفانيديوم V 273

الشكل 3-35: انواع رواسب اليورانيوم تبعا للعمر 275

الشكل 3-36: تكون رواسب اليورانيوم نتيجة لتفاعل المواد العضوية المتواجدة في الطفل الجرافيتي مع المياه الحاملة لليورانيوم 277

صفحة

الشكل 3-37: طريقة تكون أشعة ألفا وبيتا من تحلل ذرات النظائر المشعة 280

الشكل 3-38: منحنى الـ pH-Eh لأكاسيد المنجنيز 292

الشكل 3- 39: منحنى الـ pH-Eh لأكاسيد وكربونات المنجنيز في محاليل تحتوي على الكبريت 293

الشكل 3-40: مقارنة لحقول ثباتية معادن الحديد والمنجنيز 294

الفصل الرابع

الشكل 4-1: دورة الزئبق في البيئات المائية 311