

УДК 553.6+561.232

## СООТНОШЕНИЕ СТРАТИГРАФИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНЕЗИТОВ С РАЗВИТИЕМ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

© 2004 г. В. Г. Кузнецов

Представлено академиком А.Н. Дмитриевским 01.03.2004 г.

Поступило 30.03.2004 г.

В настоящее время установлено, что месторождения и рудопроявления магнезита в осадочных породах приурочены к трем стратиграфическим уровням – докембрий–нижний кембрий, верхний палеозой–нижний мезозой и палеоген–плейстоцен [1, 7, 8]. С той или иной степенью детальности изучены вещественный состав, структура и строение месторождений, их тектоническое и палеогеографическое положение. Относительно ограничено рассматриваются соотношения эпох образования месторождений магнезита с общими изменениями на Земле, с эволюцией внешних геосфер и биосферы в частности. Вместе с тем это может дать дополнительный материал для выяснения генезиса этих пород. Рассмотрению некоторых аспектов последней проблемы и посвящено настоящее сообщение.

Не рассматривая отдельных месторождений, можно отметить основные общие черты месторождений каждой из возрастных групп.

Максимальное количество магнезитов связано с самым древним – протерозой–нижнекембрийским уровнем. Месторождения этого возраста известны на Урале, Енисейском кряже, в Восточных Саянах, Забайкалье, на Дальнем Востоке, в Северо-Восточном Китае, Гималаях, США, Бразилии и других районах. Во всех этих месторождениях устанавливается отчетливая связь магнезитов с доломитами при практически полном отсутствии известняков, а также наличие промежуточных разновидностей – ассоциации доломитов с магнезитами в виде вкраплений, гнезд, линз, переходящих в пласти и линзы, представляющие уже промышленный интерес. Вторая важная черта – наличие практически везде рассеянного углеродистого первично органического вещества как в магнезитах, так и во вмещающих доломитах. Наконец, в-третьих, в ряде случаев во вмещающих доломитах установлены строматолиты, реже оолиты, которые описаны в аладинской свите

Енисейского кряжа, частично на Урале, в месторождениях Малого Хингана, на Алморских месторождениях Индийских Гималаев; иногда можно предполагать наличие микробиальной слоистости и строматолитовых структур в самих магнезитах. Так, на Карагайском участке Саткинского месторождения обнаружены теньевые строматолитовые структуры [8].

Количественное значение магнезитов второго уровня существенно меньше, месторождения более разнообразны, а стратиграфический диапазон их распространения достаточно широк – от нижнего девона до верхнего триаса. Месторождения магнезитов известны в Испании и Франции, Австрии, Словакии, Югославии, Пакистане, США, многочисленны проявления магнезитов в соляных толщах Германии, Австрии, Англии, штатах Нью-Мексико и Техас в США, на востоке Восточно-Европейской платформы.

Для магнезитов этого уровня характерно разнообразие вмещающих пород, где наряду с доломитами нередки и собственно эвапоритовые образования – гипсы, ангидриты, каменные и калийные соли, галопелиты. Среди доломитовых пород наряду с “первичными” пластовыми доломитами имеются и доломиты замещения. В ряде случаев установлены строматолитоподобные структуры, обычны также относительно повышенные содержания органического вещества.

Кайнозойские магнезиты представлены в основном пелитоморфными разновидностями и известны в Югославии, Греции, Турции, США, Австралии. Все месторождения связаны с озерными отложениями разного состава – песчано-глинистыми породами, мергелями, карбонатными породами. Минеральный состав современных озерных месторождений представлен обычно ассоциацией тригиромагнезита, гидромагнезита и хантита, а также арагонита. Принципиально важно, что, например, в озере Салда-Гёлю микробиальные сообщества образуют на субстрате толстые желатиноподобные обволакивания, “рубашки”, и гидромагнезит находится только внутри этих обволакивающих пленок и его нет там, где такие образования отсутствуют [9]. В итоге формируются гидромагнезитовые строматолиты

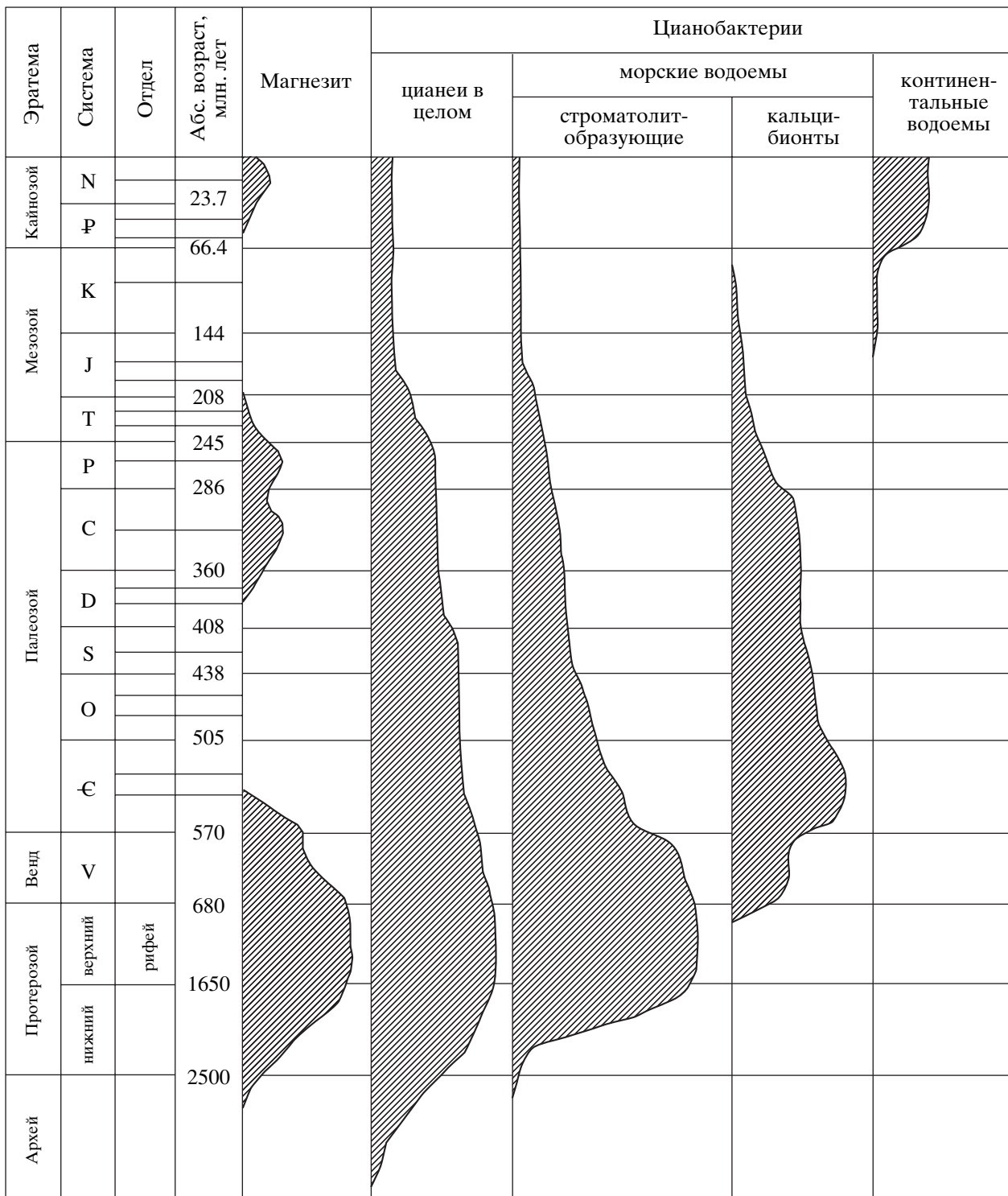


Рис. 1. Соотношение стратиграфического распределения магнезитов и развития цианобактерий.

ты. Добавим, что воды этого озера пресные, хотя и жесткие с высоким магний-кальциевым отношением. Близкая ситуация с образованием магнезитов (гидромагнезитов) в озерах вблизи лагуны Куронг Австралии [12]. Микробные сообще-

ства образуют строматолиты, среди которых имеются слоистые (стратиформные) и глобулярные. Минеральный состав обоих видов строматолитов представлен арагонитом и гидромагнезитом примерно в равных количествах.

Для большинства кайнозойских магнезитовых месторождений устанавливается достаточно тесная пространственная связь с массивами ультраосновных пород.

Интересно отметить, что стратиграфическое распределение магнезитов в двух случаях из трех четко коррелируется с этапами развития цианобактерий (рис. 1). Это касается крайних – наиболее древнего и самого молодого уровня магнезитообразования. Эпоха расцвета цианобактерий, в том числе строматолитообразующих, приходится на средний–поздний афебий, нижняя возрастная граница которого датируется в 2200–2300 млн. лет, средний–поздний протерозой (рифей отечественной шкалы), а кризис и распад приходятся на венд и начало кембрия [4, 5]. Именно с этим временным интервалом развития цианей связаны основные проявления и месторождения магнезитов. При этом возраст древнейших магнезитов горанской свиты Памира четко коррелируется с первым пиком развития цианей [4].

В кайнозое цианобактерии практически были вытеснены из морских экосистем и переместились в континентальные водоемы различной солености, но, как правило, с высокой щелочностью вод. Именно в этих озерах формировались палеоген-четвертичные магнезиты, причем в современных озерах найдены строматолиты магнезитового состава.

Что касается верхнепалеозойско-нижнемезозойского уровня распространения магнезитов, то каких-либо тесных и прямых связей с развитием цианобактериальных сообществ на глобальном уровне пока, по-видимому, не намечается.

Прямолинейная интерпретация соответствия развития магнезитов и цианей вряд ли корректна. Строго говоря, параллельное изменение двух показателей не является доказательством, что один из них определяет развитие другого; в принципе возможна некая внешняя причина, которая одновременно влияет на оба исследуемых показателя. Вместе с тем в данной ситуации, по крайней мере в ряде случаев, есть основания полагать наличие определенной генетической связи и влияния цианей на образование магнезита или, точнее, осаждение различных магнезиальных соединений типа гидромагнезита, возможно гидратов оксида магния, которые затем переходят в стабильный магнезит или даже брусит. Можно наметить по крайней мере три пути такого влияния.

Первый – это создание специфической геохимической обстановки, ведущей к осаждению магнезиальных соединений. Чисто химическое осаждение последних весьма сомнительно. Это обусловлено тем, что произведение растворимости  $MgCO_3$  составляет  $3.1 \cdot 10^{-4}$ , что в 25 раз выше произведения активных концентраций  $Mg^{2+} \times CO_3^{2-}$  в морской воде, равного  $1.2 \cdot 10^{-5}$ . Осаждаться это

соединение может лишь при pH более 9–9.2, а гидрат оксида магния вообще при pH, равном 10.5. Это подтверждено как экспериментально, так и практически, поскольку все современные магнезиты формируются в “содовых” озерах с высокой щелочностью.

Наличие автотрофов, которые извлекают в процессе фотосинтеза  $CO_2$ , как раз и ведет к повышению pH. Ведущими в этом процессе среди автотрофов являются именно цианобактериальные сообщества, поскольку они являются антагонистами высокоорганизованной биоты и в том числе животным – гетеротрофным организмам, которые в процессе метаболизма, напротив, генерируют  $CO_2$ . В протерозое, в эпоху расцвета цианей, в том числе строматолитообразующих, подобные обстановки были достаточно обычны в морских условиях, что определило широкое развитие в это время доломитов [3], а временами, видимо, магнезитов. В кайнозое, когда цианобактерии обитали лишь в специфических континентальных водоемах, подобная высокощелочная среда формировалась практически только в них, и именно здесь шло образование магнезита. Тем самым становится понятным наличие магнезитовых строматолитов, микробиально-слоистых и глобулярных биоседиментарных образований магнезиального состава как в докембрийских, так и в кайнозойских отложениях. Таким образом, осаждение магнезиальных соединений является процессом биохимическим, когда цианеи создают специфическую геохимическую обстановку (биогеогенный процесс), в которой уже химически осаждаются магнезиальные соединения.

Во-вторых, значительные массы генерированного цианеями органического вещества определяли специфическую геохимическую обстановку диагенеза, которая также была благоприятна для садки магнезиальных соединений. Развивающиеся на этом органическом субстрате сульфатредуцирующие бактерии использовали кислород сульфатов, а органическое вещество как пищу; при этом сульфаты переводились в сероводород с его последующим удалением из системы путем дегазации или образования нерастворимых сульфидов. Это вело к дефициту анионов и избытку катионов и магния в частности. В этих условиях магний легче образовывал малорастворимые карбонаты и гидраты оксидов или металлоорганические комплексы. Не исключено также, что диагенетическое метанообразование связывало значительные количества углерода и тем самым уменьшало концентрацию уголекислоты, т.е. повышало pH среды, что в целом способствует садке соединений магния.

В этом случае при избытке магния последний в виде гидроксидов начинает осаждаться при pH 8–8.4 [6]. Это положение показано, в частности,

на современных осадках, где в оболочке цианобактерий концентрация магния возрастает в 3–4 раза. Это ведет к резкому повышению магний-кальциевого отношения до 25–30:1 против 4.5:1 в морской воде [10]. Одновременно пониженное содержание сульфат-ионов способствует образованию доломита [9]. Осаждение карбонатов магния в виде протодоломита в присутствии сульфатредуцирующих бактерий было показано экспериментально [11].

Косвенным подтверждением реальности такого пути образования магnezита является частое наличие органического вещества в фанерозойских магnezитах и включающих их доломитах и рассеянного углеродистого материала как проукта метаморфизации органического вещества в докембрийских образованиях.

Наконец, в-третьих, не исключено, что имеет место, хотя бы частично, и чисто биогенный процесс физиологического усвоения цианеями магния, поскольку известны чисто кальцитовые, доломитовые, фосфатные, железистые, кремнистые строматолиты, т.е. намечается некоторая специализация цианей по их минералообразующим свойствам.

Сложнее обстоит дело с магnezитами среднего – верхнепалеозойско-нижнемезозойского уровня. Во-первых, сами проявления и месторождения магnezита более разнообразны – наряду с месторождениями в доломитах широко распространены магnezиты в ангидритах и даже солях, некоторые месторождения в доломитах также резко отличаются от “типовых” месторождений такого типа. Таковы, например, верхнекаменноугольные месторождения Словакии, связанные с вторично доломитизированными коралловыми рифами. Во-вторых, для этого этапа не отмечено глобального увеличения интенсивности развития цианей, нет четких указаний на наличие микробных образований в магnezитах и ассоциирующих с ними отложениях, хотя в ряде случаев присутствуют строматолитоподобные структуры вмещающих доломитов (например, в Испании).

В какой-то мере возможно, что на изменение рН влияли не только цианеи, но и другие автотрофы, в частности багряные водоросли, один из этапов расцвета которых приходится именно на карбон–пермь. О том, что локальные изменения щелочности возможны за счет жизнедеятельности водорослей, свидетельствует факт повышения рН до 9.0–9.2 в зоне развития водорослей в Северном Каспии [2]. Вместе с тем это воздействие либо весьма косвенно, либо сугубо локально; не исключено, что оно имело место в прибиогермных участках каменноугольных образований Словакии.

Что касается магnezитов соленосных толщ, то почти однозначно они считаются хемогенными, образовавшимися путем прямого осаждения кар-

бонатов магния в условиях повышенной солености, хотя, как показано выше, чисто химическая садка карбонатов магния практически исключена. Вместе с тем известно, что в этих условиях при отсутствии относительно высокоорганизованной флоры и тем более фауны цианеи прекрасно существуют. К сожалению, автору неизвестны новейшие исследования литологии верхнепалеозойских магnezитов и вмещающих их доломитов и, соответственно, наличия или отсутствия микробально-водорослевых образований. Эти образования, исключая морфологически весьма своеобразные строматолиты, стали выделять и изучать сравнительно недавно, и в относительно старых работах о них не упоминается.

Не исключено, что и в этих случаях они существовали, утилизировали  $\text{CO}_2$  и при отсутствии генераторов этого газа в виде животных организмов рН существенно повышалось и здесь также шло не чисто химическое, а биохимическое осаждение. Другими словами, повышенная соленость являлась не прямой причиной выпадения в осадок магnezиальных соединений, а опосредованной – в этих условиях могли существовать только микробные сообщества, которые и создавали среду, определяющую осаждение магnezиальных соединений, причем не по солености, а по величине рН. Некоторым аргументом в пользу этого может служить факт, что в современных объектах образование магnezита (гидромагnezита) происходит и в пресных и в опресненных водоемах, но с высоким значением рН, примером чему может быть озеро Салда-Гёлю.

Сказанное, естественно, является лишь гипотезой, достаточно обоснованным предположением, и вопрос этот требует специального дополнительного изучения, в том числе и в русле высказанного предположения о наличии в соленосных отложениях микробных структур с целью их выявления и исследования.

Вместе с тем наличие микробных сообществ, видимо, является важной, но не единственной причиной образования магnezита. Скорее всего существуют и другие факторы, способствующие или, напротив, затрудняющие, или даже исключают такой процесс. По-видимому, благоприятно также повышенное поступление в водоемы магния, поскольку осаждению карбонатов магния способствует высокое отношение магния к кальцию. Так, воды современного озера Салда-Гёлю в Турции содержат около 200 ppm магния и лишь 3 ppm кальция, т.е. существенно магnezиальны. Весной же, в период активного развития водорослей и осаждения магnezита это отношение в связи с выводом в осадок магния меняется на противоположное: 22 ppm магния против 34 ppm кальция [9]. Для кайнозойских озер, где формируются магnezиты, установлены тесные

пространственные связи с областями развития ультраосновных массивов, денудация и выветривание которых и обеспечивает поступление в водоемы повышенных количеств магния.

Весьма интенсивны, по-видимому, и вторичные процессы перекристаллизации и перераспределения вещества, что создает видимость метасоматического происхождения магнезита.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено общее соответствие эпох формирования магнезитов с этапами развития цианобактериальных сообществ. Многочисленные и наиболее крупные месторождения магнезита в протерозое коррелируются с эпохой расцвета цианобактерий. Кайнозойские магнезиты формировались в континентальных водоемах, куда в это время из морских обстановок переместились цианеи.

Во многих случаях во вмещающих отложениях, а иногда и в самих магнезитах установлены строматолитовые и другие биоседиментарные структуры.

Таким образом, предложен биохемогенный механизм образования магнезита. Цианеи, а иногда и другие автотрофы в процессе фотосинтеза усваивали растворенный в воде  $\text{CO}_2$ , повышая тем самым рН среды. При высоких значениях щелочности и происходило осаждение магнезиальных соединений, которые затем образуют магнезит. Этому процессу способствует и повышенное количество органического вещества, которое, разлагаясь, создает в диагенезе щелочную среду, способствующую осаждению соединений магния. Тем самым осаждение магния обусловлено не повышенной соленостью, а высокими значениями

рН. Частая повышенная соленость водоема определяет лишь угнетение высокоорганизованных гетеротрофов и при их отсутствии эту экологическую нишу оккупируют микробные, в том числе цианобактериальные сообщества.

Работа выполнена в рамках программы Университеты России (грант УР. 09.01.006).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смолин П.П., Шевелев А.И., Урасина Л.П. и др.* Генетические типы, закономерности размещения и прогноз месторождений. М.: Наука, 1984. 320 с.
2. *Книпович Н.М.* Гидрология морей и солоноватых вод. М.; Л., 1938. 513 с.
3. *Кузнецов В.Г.* // ДАН. 2001. Т. 378. № 3. С. 366–369.
4. *Семихатов М.А., Раабен М.Е.* // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1996. Т. 4. № 1. С. 6–20.
5. *Соколов Б.С.* Очерки становления венда. М.: КМК Sci. Press, 1997. 156 с.
6. *Сонненфельд П.* Рассолы и эвапориты. М.: Мир, 1988. 480 с.
7. *Шевелев А.И.* // Геология и геофизика. 1977. № 5. С. 67–75.
8. *Шевелев А.И., Зуев Л.В., Федоров В.П.* Минерально-сырьевая база магнезита и брусита России. Казань: Новое знание, 2003. 162 с.
9. *Braithwaite C.J.R., Zedef V.* // J. Sediment. Res. Sec. A. 1996. V. 66. № 5. P. 991–1002.
10. *Gebelein C.O., Hoffman P.* // J. Sediment. Petrol. 1973. V. 43. № 3. P. 602–613.
11. *Vasconcelos Cr., McKenzie Ju., Brnasconi St. et al.* // Nature. 1995. V. 377. P. 220–222.
12. *Walter M.R., Golubic S., Preiss W.V.* // J. Sediment. Petrol. 1973. V. 43. № 4. P. 1021–1030.