

## ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРЫ ПОРОД НА АРКТИЧЕСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ

С. М. Фотиев

*Институт криосферы Земли СО РАН, 117982, Москва, ул. Вавилова 30/6, к. 74а*

Криогенная метаморфизация химического состава воды и вмещающих ее пород происходит при понижении их температуры ниже 0° С. Установлено, что в процессе вымораживания морской воды достаточно уверенно выделяются три стадии криогенного метаморфизма ее химического состава: I — охлаждение, II — концентрация и III — десульфатизация. Каждая стадия криогенного метаморфизма протекает в узком диапазоне температуры и вследствие этого характеризуется вполне определенной интенсивностью физико-химических процессов, весьма своеобразным химическим составом и конкретной степенью минерализации криометаморфизованных вод.

По данным исследований составлена палетка. В ее левой части расположена кривая изменения минерализации морской воды при ее последовательном вымораживании в интервале от 0 до -22,5° С, в ее правой части приведены формулы химического состава криометаморфизованной морской воды. Они характеризуют строгую последовательность изменения химического состава криопеггов при понижении их температуры до -1,8; до -3,5; до -7,4; до -10; до -15 и до -22,5° С. Пользоваться палеткой очень просто. Необходимо найти на кривой солёности точку, которая соответствует солёности криопега, отобранного либо из скважины, либо из источника. Затем необходимо сопоставить данные о температуре, минерализации и химическом составе криопега с контрольными данными, приведенными на палетке. Это позволит определить минимальную температуру охлаждения водовмещающих пород.

*Гидрохимия, криопег, формула химического состава, палеотемпература пород*

### HYDROCHEMICAL METHOD FOR ESTIMATION OF PALEOTEMPERATURE OF ROCKS ON THE ARCTIC COAST

S. M. Fotiev

*Earth Cryosphere Institute SB RAS, 117982, Moscow, Vavilov st. 30/6, room 74a*

Cryogenic metamorphism of the chemical composition of sea water and containing it rocks occurs upon their cooling below 0° C. It was established that in the course freezing from 0 to -22,5° C three clear-cut stage of cryogenic metamorphism of its chemical composition may be reliably differentiated: cooling, concentration and desulfurization. Each stage cryogenic metamorphism of sea water takes place within a narrow temperature range and, hence, is characterized by definite rates intensity of physico-chemical processes, specific chemical composition, and salinity level.

The results of our studies were used to plot a diagram: its left part presents a curve of sea water mineralization upon its gradual freezing from 0 to -22,5° C, while the right portion features formulas of the chemical composition of cryopegs with temperature lowering to -1,8; -3,5; -7,4; -10,0; -15,0 and -22,5° C.

The use of the diagram is very simple. It is necessary to find on the mineralisation curve the point corresponding the salinity of a cryopeg sampled from either a bore-hole or a natural spring. Then one should compare the data on temperature, salinity and chemical composition of this cryopegs with the control data also shown in the diagram. This makes it possible to determine minimum temperature of the water-bearing deposit cooling.

*Hydrochemistry, cryopeg, formula of chemical composition, paleotemperature of rocks*

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что на протяжении плейстоцена и голоцена эпохи трансгрессий морей Северного Ледовитого океана неоднократно сменялись их регрессиями. Уровень воды в океане то поднимался до отметок +150 м, то опускался до отметок -250 м. В периоды трансгрессий морские воды затопляли огромные территории в пределах равнин, приуроченных к участкам, на которых преобладали слабые тектонические опускания. Начиная с плейстоцена, при осушении

морских акваторий происходило охлаждение и частичное промерзание донных отложений, поры которых были заполнены морскими водами. Дальнейшее охлаждение пород уже в субэвраль-ных условиях приводило к криогенной метаморфизации пород и подземных вод морского генезиса. Сказанное позволяет считать, что гидрологические и геокриологические условия на Арктическом побережье от Кольского п-ова до Чукотки были весьма благоприятны для

формирования и последующего сохранения криопэггов морского генезиса.

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ КРИОГЕННОЙ МЕТАМОРФИЗАЦИИ МОРСКОЙ ВОДЫ

Криогенная метаморфизация морской воды, как известно, протекает в широком температурном диапазоне от 0 до  $-32^{\circ}\text{C}$  [Гиттерман, 1937]. Тем не менее в конкретном температурном диапазоне преобладают разные физико-химические процессы, протекающие с разной интенсивностью. Вследствие этого криометаморфизованные воды морского генезиса сохраняют не только большую информацию о физико-химических процессах, но и о температуре пород, при которой шло промерзание водовмещающих пород. Наиболее четкие сведения о палеотемпературных изменениях можно получить в закрытых водообменных системах (ВОС) в недрах гидрогеологических структур [Фотиев, 1978], расположенных на побережье Арктических морей и затапливаемых морскими водами в период четвертичных трансгрессий. Только в закрытых ВОС состав криометаморфизованных вод может сохраняться на протяжении десятков тысяч лет, а может быть и более. В открытых ВОС, особенно в бассейнах грунтовых вод, состав воды может существенно изменяться даже на протяжении одного года. Тем не менее по химическому составу даже опресненных криопэггов возможно не только определить минимальную температуру охлаждения водовмещающих пород, но и выяснить причины и степень их последующего опреснения. Эти свойства криометаморфизованных морских вод и рекомендуется использовать при восстановлении палеогеоэкологической и палеогеографической обстановки на Арктическом побережье.

В основу гидрохимического метода палеотемпературных реконструкций положены закономерности криогенного преобразования состава морской воды, выявленные ранее [Гиттерман, 1937; Фотиев, 1987; 1991; 1996]. Удалось выяснить, что в процессе охлаждения морской воды в интервале температур от 0 до  $-22,5^{\circ}\text{C}$  достаточно четко выделяются три стадии криогенного метаморфизма ее химического состава (рис. 1 и 2).

I стадия—охлаждение: интервал температур от 0 до  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . На этой стадии происходит лишь охлаждение морской воды без изменения объема жидкой фазы, ее химического состава и степени минерализации.

II стадия—концентрирование: интервал температур от  $-1,8$  до  $-7,4^{\circ}\text{C}$ . На этой стадии происходит интенсивная кристаллизация жидкой фазы воды, сопровождающаяся ее криогенным концентрированием. Криогенная концентрация криопэггов на этой стадии не сопровождается существенным изменением химического состава,

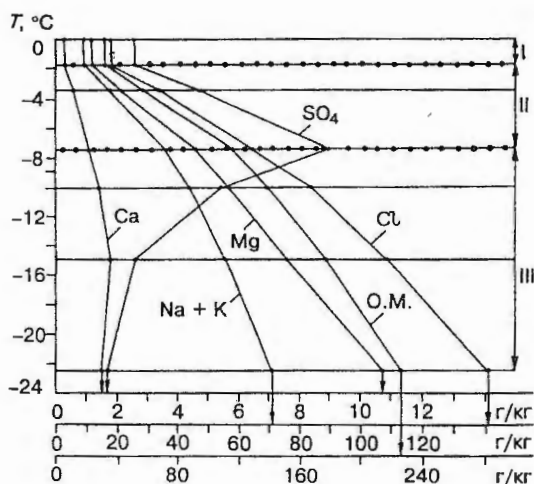


Рис. 1. Изменение содержания главных ионов в морской воде при понижении ее температуры от 0 до  $-22,5^{\circ}\text{C}$  (рассчитано С.М. Фотиевым по графику К.Э. Гиттерман, 1937):

I—III — стадии криогенного метаморфизма морской воды: I — охлаждение; II — концентрирование; III — десульфатизация.

так как в этом интервале отрицательной температуры в осадок выпадает только  $\text{CaCO}_3$ , содержание которого в морской воде невелико — всего 136 г/кг.

Следовательно морские воды в порах и трещинах пород, прошедшие две стадии криогенной метаморфизации: охлаждение и концентрирование в интервале температур от 0 до  $-7,4^{\circ}\text{C}$ , должны характеризоваться: 1) высокой минерализацией, нередко достигающей 100–120 г/кг; 2) хлоридно-натриевым составом, отличающимся от состава морской воды предельно высоким содержанием  $\text{SO}_4$  — до 9,1 г/кг, высоким содержанием Cl — до 66 г/кг, Na+K — до 37,1 г/кг и Mg — до 4,6 г/кг и пониженным содержанием или полным отсутствием  $\text{HCO}_3$ . Льдовмещающие породы в тех случаях, когда криометаморфизм пород протекал *in situ*, должны быть обогащены кристаллами кальцита. В этом интервале температур из каждого литра криометаморфизованной морской воды выпадает в осадок от 25 до 117 мг солей [Фотиев, 1996].

III стадия — десульфатизация: интервал температур от  $-7,4$  до  $-22,5^{\circ}\text{C}$ . На этой стадии происходит медленная кристаллизация криопэггов, значительное увеличение их минерализации и существенное изменение их химического состава. Анализ графиков на рис. 1 и 2 показывает, что при охлаждении морской воды до  $-15^{\circ}\text{C}$  в жидкой фазе остается только 16%, т.е. объем криопэггов сократился всего на 16%, а в интервале температур от  $-15$  до  $-22,5^{\circ}\text{C}$  — всего на 4%.

Медленное вымораживание криопэггов сопровождается активным ростом их минера-

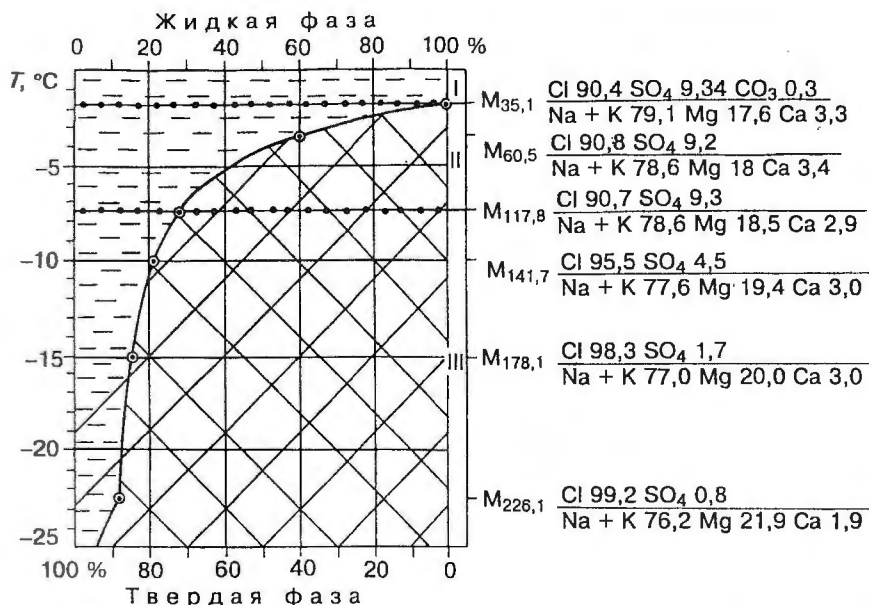


Рис. 2. Изменение содержания жидкой фазы морской воды и формулы ее химического состава на разных стадиях криогенного метаморфизма (рассчитано С.М. Фотиевым по графику К.Э. Гиттерман, 1937).

I—III — см. на рис. 1.

лизации. При температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  минерализация криопэггов достигает 180 г/кг, а при температуре  $-22,5^{\circ}\text{C}$  — уже 226,1 г/кг, т.е. увеличивается на протяжении III стадии криометаморфизма почти в два раза. Важно подчеркнуть, что увеличение минерализации происходит на фоне активной кристаллизации мирабилита ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) за счет существенного увеличения содержания ионов Cl, Na+K и Mg.

Хлоридно-натриевый состав криопэггов не изменился, несмотря на практически полное выпадение в осадок карбонатных и сульфатных солей. В формуле химического состава содержание  $\text{SO}_4$  уменьшилось с 9,3 до 0,8% (см. рис. 1 и 2). Следовательно, морские воды в трещинах и порах пород, прошедшие все три стадии криогенного метаморфизма (охлаждение, концентрирование и десульфатизацию) в интервале температур от 0 до  $-22,5^{\circ}\text{C}$ , превратились в криопэги, которые характеризуются: 1) высокой и очень высокой минерализацией — от 120 до 230 г/кг, 2) хлоридно-натриевым составом, отличающимся от состава морской воды предельно высоким содержанием Cl — 146 г/кг, высоким содержанием Mg — 10,7 г/кг и Ca — 1,5 г/кг, но пониженным содержанием или полным отсутствием  $\text{SO}_4$  и  $\text{HCO}_3$ .

Льдовмещающие породы в тех случаях когда криометаморфизм подземных вод протекал *in situ*, должны быть обогащены кристаллами кальцита и мирабилита. В этом интервале температур из каждого литра криометаморфизованной

морской воды в осадок выпадает от 5 до 11 г карбонатных и сульфатных солей.

Важно отметить, что даже в конце третьей стадии криогенного метаморфизма при охлаждении криопэггов до температуры  $-22,5^{\circ}\text{C}$  кристаллизация хлоридных солей не происходит, хотя их минерализация уже достигает 200—230 г/кг, т.е. в 7 раз больше чем в нормальной морской воде. Отсюда вытекает важный вывод о том, что в льдовмещающих породах даже при их охлаждении до температуры  $-22,5^{\circ}\text{C}$  кристаллов хлоридных солей быть не может.

Выявленные закономерности криогенного преобразования морской воды на разных стадиях криогенного метаморфизма позволили построить палетку (рис. 3). В ее левой части расположена кривая изменения минерализации морской воды при ее последовательном вымораживании в интервале температур от 0 до  $-22,5^{\circ}\text{C}$ . В правой части палетки приведены температурные интервалы I, II, III стадий криогенного метаморфизма и формулы химического состава криометаморфизованной морской воды. Они характеризуют строгую последовательность изменения состава и минерализации криопэггов при понижении их температуры до  $-1,8$ ;  $-3,5$ ;  $-7,4$ ;  $-10$ ;  $-15$  и до  $-22,5^{\circ}\text{C}$ .

Пользоваться палеткой очень просто. Необходимо нанести на кривую солёности точку, которая соответствует солёности криопэга, отобранного из источника или из скважины. Затем необходимо сопоставить данные о температуре,

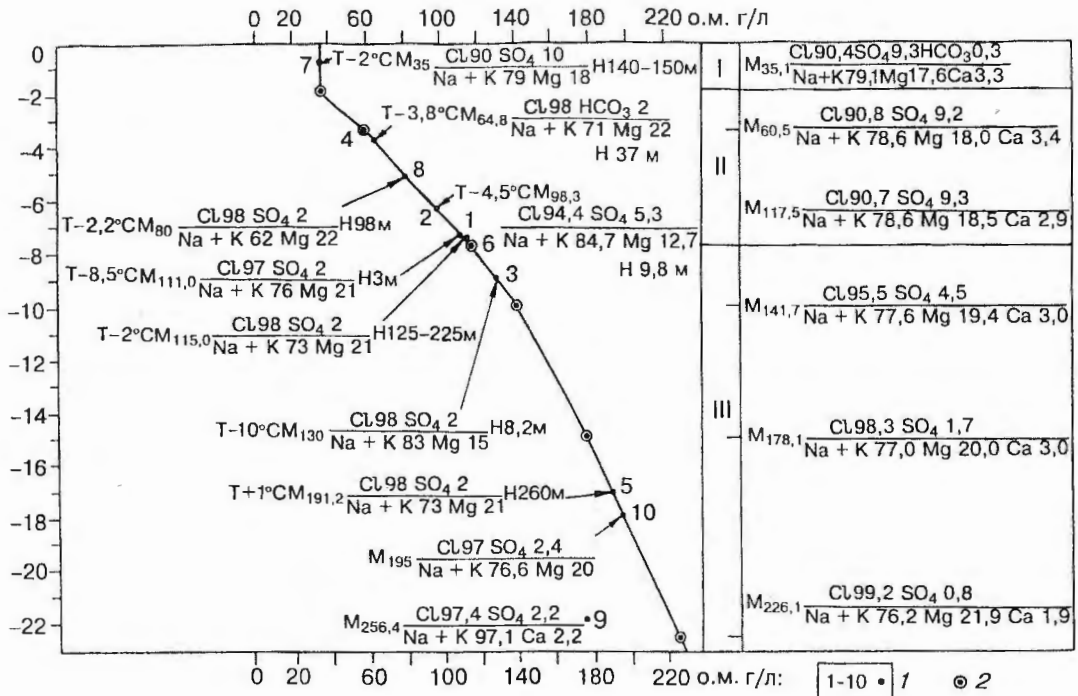


Рис. 3. Палетка для определения генезиса и геотемпературных условий формирования соленых хлоридно-натриевых вод.

1—2 — местоположение точек на кривой изменения минерализации морской воды при ее последовательном вымораживании [Гиттерман, 1937]: 1 — номера анализов криопэггов, генезис и температуру формирования которых надо определить; 2 — формулы химического состава криометаморфизованной морской воды при понижении ее температуры до -1,8; -3,5; -7,4; -10; -15 и -22,5°C; I—III — см. на рис. 1.

минерализации и химическом составе криопэга с контрольными данными, приведенными в правой части палетки. Это позволит: 1) определить минимальную температуру охлаждения водовмещающих пород; 2) выявить причину и степень опреснения криометаморфизованных вод и 3) судить о составе и количестве солей, выпавших в осадок в водовмещающие породы в процессе криогенной метаморфизации морской воды. Покажем этот процесс на конкретных примерах.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И МИНЕРАЛИЗАЦИИ КРИОПЭГОВ

К настоящему времени на побережье и на шельфе всех Арктических морей от Баренцева до Охотского собран большой фактический материал о криометаморфизованных водах морского генезиса. Они обнаружены в разных гидрогеологических структурах, в разных грунтовых бассейнах и на различной (от 1 до 300 м и более) глубине от поверхности. Судя по составу и степени минерализации, они прошли различные стадии криогенного метаморфизма, а, следовательно, формировались в различных геотемпера-

турных условиях. Важно знать, что криопэги, залегающие в пределах слоя с годовыми колебаниями температуры пород на глубинах до 15—20 м, а тем более в пределах сезонноталого слоя, несут информацию о физико-химических процессах криогенного преобразования химического состава и минерализации морской воды в современных климатических условиях. Информацию о температурном режиме криогенного метаморфизма состава и минерализации морской воды в плейстоцене можно получить только при анализе сведений о криопэгах, залегающих в интервале глубин 20—300 м и более.

Криопэги в слое с годовыми колебаниями температуры пород наиболее детально изучены на лайдах Западного и Северного Ямала. Линзы песков с криометаморфизованными хлоридно-натриевыми водами с минерализацией 70—160 г/кг и температурой от -2 до -8,5°C были обнаружены в процессе проходки скважин на глубинах от 1,5 до 10,0 м. При этом чем ближе к поверхности залегает линза с криопэгами, тем выше их минерализация и ниже температура. Несмотря на то, что все пробы воды были отобраны в летний период, по степени их минерализации и особенно по содержанию отдельных ионов можно с достаточной уверенностью судить

о минимальной температуре охлаждения водовмещающих пород в зимний период и о степени их опреснения — в летний.

Химический состав и минерализация криопэггов, отобранных на о. Белый с глубины 2,5—3,5 м [Трофимов и др., 1973, рис. 3.1], свидетельствуют о том, что они сформировались в процессе III стадии криометаморфизма. Зимой при охлаждении водовмещающих пород до  $-10...-15^{\circ}\text{C}$  минерализация криопэггов достигала 150—160 г/кг, а их химический состав существенно изменился в результате активной кристаллизации мирабилита. Этот вывод подтверждается обилием мирабилита в керне скважины и незначительным (всего 2 мг/экв. %) содержанием  $\text{SO}_4$ . Летом, в результате разбавления криопэггов пресной водой, произошло повышение температуры и снижение их минерализации. Об этом свидетельствует повышенное содержание ионов  $\text{HCO}_3$  и Ca (соответственно 1 и 4 мг/экв. %).

В середине июля 1989 г. Е. Н. Знаменским на дайде в заливе Шарапов Шар линза с криопэггами была встречена на глубине 9,8 м от поверхности. Уровень напорных криопэггов установился на глубине 0,8 м от поверхности, т.е. весьма выше подошвы слоя сезонного протавивания. Сравнительная минерализацию и химический состав криопэгга из скважины с контрольными данными, приведенными на палетке (см. рис. 3.2), можно сделать следующие выводы. Во-первых, содержание сульфатов свидетельствует о формировании химического состава криопэггов в начале III стадии криометаморфизма — при температуре водовмещающих песков в зимнее время до  $-8...-9^{\circ}\text{C}$ : минерализация криопэггов тогда достигала 120—130 г/кг. Во-вторых, проба на анализ отбиралась с глубины 1,7 м (напомним, что криопэгги напорные); следовательно она характеризует лишь химический состав и минерализацию криопэггов, уже разбавленных пресными водами сезонного слоя. Температура криопэггов ( $-4,5^{\circ}\text{C}$ ), замеренная на глубине 2 м, также не характеризует истинные температурные условия в линзе песков на глубине 10 м. Судя по изоплетам на рис. 4, температура пород в середине июля на глубине 10 м должна быть порядка  $-7,5^{\circ}\text{C}$ . Этот пример достаточно типичен для фактического материала, получаемого в процессе изысканий в летний период. Он убедительно указывает на необходимость более тщательного отбора проб на анализ для получения сведений о химическом составе, минерализации и температуре криопэггов на глубине их залегания.

Рассмотренные выше анализы криопэггов, а также многие другие, свидетельствуют о том, что химический состав и минерализация криопэггов на п-ове Ямал в пределах слоя с годовыми колебаниями температуры пород формируется при

охлаждении водовмещающих пород до  $-10...-15^{\circ}\text{C}$ . Возможность охлаждения пород до  $-10...-15^{\circ}\text{C}$  подтверждается графиком изоплет (см. рис. 4). На графике видно, что в весенний период (март—апрель) породы на глубине 2 м охлаждаются до  $-15^{\circ}\text{C}$  и ниже. На глубине 5 м от поверхности они охлаждаются до  $-10^{\circ}\text{C}$  только в мае и в июне. Глубины 10 м волна зимнего охлаждения пород с температурой  $-7,4^{\circ}\text{C}$  (начало III стадии криометаморфизма) достигает лишь в июле. Выделенные на графике температурные зоны, соответствующие различным стадиям криометаморфизма, показывают, что на п-ове Ямал криопэгги в песчаных линзах, залегающих на глубине до 10 м, могут проходить все три стадии криометаморфизма. Наиболее значительное обогащение пород мирабилитом в современных климатических условиях происходит в самых верхних горизонтах пород (до глубины 5 м).

В аналогичных суровых современных климатических и геокриологических условиях сформировался химический состав и минерализация криопэгга, отобранного на Земле Франца Иосифа с глубины 8,2 м [Неизвестнов и др., 1971]. На рис. 3 видно насколько химический состав и минерализация криопэгга, отобранного из скважины, близки к расчетным.

Криопэгги в речных долинах Западного Ямала были обнаружены практически повсеместно. Это объясняется проникновением морских вод по днищам долин вглубь материка на 50—80 км. Линзы песков с криопэггами были вскрыты многочисленными скважинами на глубине от 5 до 50 м. Минерализация криопэггов в зависимости от степени опреснения изменяется от 10 до 100 г/кг, иногда и более, тогда как их химический состав вне зависимости от степени опреснения остается неизменным — хлоридно-нат-

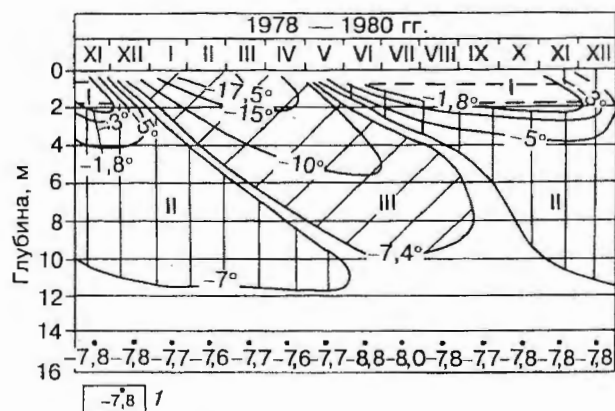


Рис. 4. Геотермические условия развития I, II и III стадий сезонного криометаморфизма морской воды.

Температура пород на площадке Харасавейского стационара по данным Н.Ф.Григорьева (1987); 1 — температура пород на глубине 15 м. I — III см. на рис. 1.

риевым. О степени опреснения можно судить по увеличению содержания иона  $\text{HCO}_3$  от 1—10 мг/экв. % при минерализации 60—100 г/кг до 26 мг/экв. % — при минерализации 10 г/кг. Несмотря на значительное разбавление криометаморфизованных вод морского генезиса пресными водами, по палетке на рис. 3 можно восстановить температуру, при которой криопэг сформировался.

Полное отсутствие сульфатов и высокое содержание иона магния (см. рис. 3. 4) позволяют предположить, что криопэги, отобранные из скважины на пойме р. Юрибей с глубины 37 м, сформировались в процессе III стадии криометаморфизма при температуре ниже  $-10...-15^\circ\text{C}$ : минерализация их была более 150—160 г/кг.

Криопэги в недрах гидрогеологических структур были обнаружены в процессе бурения глубоких скважин на п-ове Ямал, на островах Новой Земли и Вайгаче, на Шпицбергене, на Северной Земле, Земле Франца Иосифа, на Чукотке и т.д. Они были вскрыты в интервале глубин 90—300 м (реже более) и вследствие этого содержат интересную информацию о геотемпературных условиях наиболее холодной сартанской эпохи плейстоцена.

Химический состав и минерализация хлоридно-натриевых рассолов, вскрытых скважиной в интервале глубин 260—332 м в толще палеозойских известняков на Южном о-ве Новой Земли [Неизвестнов и др., 1971, рис.3.5], представляют в этом отношении особый интерес. Несмотря на значительную глубину залегания, несмотря на современную положительную температуру рассолов, нет никакого сомнения в том, что химический состав и минерализация рассолов сформировались в процессе III стадии криометаморфизма воды морского генезиса при охлаждении водовмещающих пород до температуры  $-17^\circ\text{C}$ . Совпадение химического состава и минерализации рассолов из скважины с расчетными данными (см. рис. 3) позволяет говорить о том, что криопэги залегают в закрытой ВОС, в которой современный водообмен практически полностью отсутствует. Можно допустить две версии формирования криопэгов такого состава. Первая — охлаждение водовмещающих пород на глубине 250 м до температуры ниже  $-15^\circ\text{C}$  происходило *in situ* в сартанское время. Это предположение, если оно верно, существенно изменит современные представления о палеоклимате в плейстоцене. Вторая — криогенная метаморфизация морской воды происходила в более высоких горизонтах в интервале глубин 100—150 м. Высококонтрированные криопэги, повинувшись закону гравитации, погружались в недра закрытой структуры.

О существенном охлаждении (до  $-10...-15^\circ\text{C}$ ) водовмещающих пород в сартанское время также свидетельствует химический состав криопэгов,

отобранных в этой же структуре, но в интервале глубин 125—225 м [Неизвестнов и др., 1971]. Они залегают непосредственно ниже подошвы современной толщи многолетнемерзлых пород (рис. 3.6). Повышение температуры водовмещающих пород в голоцене до  $-2^\circ\text{C}$  привело к вытаяванию ледяных включений и опреснению криопэгов.

Напорные криопэги, вскрытые скважиной, пробуренной в бухте Варнека на о. Вайгач в интервале 140—150 м, информации о палеотемпературных условиях в недрах структуры не несут [Неизвестнов и др., 1971]. Их состав и минерализация, практически полностью совпадающие с составом и минерализацией морской воды (рис. 3.7), свидетельствуют об открытости структуры и о гидравлической связи подземных и морских вод. Тем не менее обилие кристаллов мирабилита в керне скважины убедительно говорит об охлаждении пород этой структуры в сартанскую эпоху плейстоцена до температуры ниже  $-7,4^\circ\text{C}$ .

Химический состав и минерализация криопэгов, отобранных в Казакчинской впадине на Чукотке с глубины 100 м [Готов, 1972], свидетельствуют о том, что подземные воды явно морского генезиса претерпели значительные, но не однонаправленные изменения (рис. 3.8). Большое содержание магния и незначительное содержание сульфат-иона явно свидетельствуют о значительном криогенном преобразовании исходного состава морской воды при температуре порядка  $-13^\circ\text{C}$ . В процессе криогенной концентрации минерализация криопэгов, скопления которых сосредоточились в синклиналиях, складках, повысилась до 150—160 г/кг. В эту же холодную эпоху произошла активная кристаллизация мирабилита и, как следствие, существенная десульфатизация состава криопэгов. Это подтверждается обилием кристаллов мирабилита в керне скважины [Готов, 1972]. На протяжении голоцена геотермические условия в недрах впадины изменились: температура пород повысилась до  $-2,2^\circ\text{C}$  — произошло криогенное опреснение состава криопэгов за счет вытаявания ледяных включений. Уменьшение мощности криогенного водоупора обеспечило возможность смешения криометаморфизованных вод морского генезиса с пресными гидрокарбонатно-кальциевыми подземными водами. Это подтверждается повышенным содержанием кальция в современном составе криопэгов (см. рис. 3.8).

Рассмотрим химический состав и минерализацию еще двух криопэгов, отобранных В.М.Пономаревым (1950) в районе бухты Кожевникова (п-ов Таймыр). Первая проба отобрана из скважины 1-бис с глубины 228 м (см. рис. 3.9), а вторая отобрана в феврале на промерзающей отмели (см. рис. 3.10). На графике отчетливо видна существенная разница химиче-

ского состава хлоридно-натриевых рассолов при сравнимой достаточно высокой их минерализации. Криопэг, отобранный из скважины — типичный хлоридно-натриевый рассол с незначительным содержанием кальция и магния, характерный для вод выщелачивания. И это действительно так — сважина 1-бис расположена на соляном куполе. Криопэг, отобранный на отмели — типичная морская вода, прошедшая три стадии криометаморфизма (см. рис. 3).

### ВЫВОДЫ

1. Строгая последовательность криогенного преобразования химического состава и минерализации морской воды при ее последовательном вымораживании — основа гидрохимического метода определения палеотемпературы пород.

2. Разработана палетка, с помощью которой по составу и минерализации криометаморфизованной морской воды можно определить минимальную температуру охлаждения пород, вмещающих криопэги.

3. Криопэги, залегающие на глубине до 15–20 м от поверхности (в пределах слоя с годовыми колебаниями температур пород), несут информацию о температурных условиях криогенного метаморфизма состава морской воды в современных климатических условиях.

4. Криопэги, залегающие в недрах закрытых структур на глубине более 25 м, несут информацию о температурных условиях криогенного метаморфизма состава морской воды в сартанскую эпоху плейстоцена.

5. Химический состав и минерализация криопэгов, отобранных из глубоких скважин в различных секторах Арктики, свидетельствуют о

том, что в сартанскую эпоху плейстоцена породы на глубине 100 м охлаждались до температуры  $-10...-15^{\circ}\text{C}$ .

### Литература

Гиттерман К.Э. Термический анализ морской воды // Концентрирование соляных растворов вымораживанием. Тр. соляной лаборатории АН СССР. Ч.1, вып.15. М., Изд-во АН СССР, 1937, с. 5—24.

Глотов В.Е. Формирование подземных вод в артезианских бассейнах зоны многолетнемерзлых пород. Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М., 1972.

Григорьев Н.Ф. Криолитозона прибрежной части Западного Ямала. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1987, 112 с.

Неизвестнов Я.В., Обидин Н.И., Толстихин Н.И., Толстихин О.Н. Гидрогеологическое районирование и гидрогеологические условия советского сектора Арктики // Геология и полезные ископаемые севера Сибирской платформы. Л., Изд-во НИИГА, 1971, с. 92—106.

Пономарев В.М. Формирование подземных вод по побережью северных морей в зоне вечной мерзлоты. М., Изд-во АН СССР, 1950, 96 с.

Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Криопэги полуострова Ямал // Инженерные изыскания в строительстве. Сер. 2. Реф. сб. №3(2). М., Изд-во ПНИИИС, 1973, с.26—30.

Фотиев С.М. Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР. М., Наука, 1978, 236 с.

Фотиев С.М. Состав и минерализация криометаморфизованных подземных вод как палеотемпературный показатель // Изв. АН СССР, сер. географ., № 1, 1991, с. 74—80.

Фотиев С.М. Закономерности криогенной метаморфизации химического состава морской воды // Криолитозона и подземные воды Сибири. Часть вторая. Якутск, ИМЗ СО РАН, 1996, с. 16—26.

Поступила в редакцию  
21 мая 1997 г.