УДК 551.345

**ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ АГРЕССИВНОСТИ КРИОПЭГОВ НА ПРИМЕРЕ ВЫСОКО МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РАСТВОРОВ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ**

**Шиманов А.А., Комаров И.А.**

**Shimanov A.A., Komarov I.A.**

**ШИМАНОВ А.А.\***

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,* *inferit90@mail.ru*

**Адрес:** *Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия*

**КОМАРОВ И.А.**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,* *ilya\_komarov@mail.ru*

**Аннотация**

В статье на основе экспериментальных данных по химическому составу и концентрации криопэгов полуострова Ямал, залегающих на разных глубинах в слое годовых колебаний температур, а также теоретических разработок, включающих использование оригинального программного продукта, моделирующего процесс криогенного метаморфизма растворов при изменении термобарических условий, предложена методика оценки их коррозионной агрессивности. Она включает в себя: количественную оценку изменений фазового и химического состава криопэгов при изменении термобарических условий; оценку степени агрессивного воздействия криопэгов на материалы фундамента учитывая соответствующие нормативные документы. Показана необходимость учета процесса криогенного метаморфизма криопэгов в диапазоне природных отрицательных температур на степень коррозионной агрессивности. Понижение температуры приводит к возрастанию их коррозионной агрессивности. Существенное влияние на агрессивность оказывает динамика изменения концентрации сульфат- иона и иона магния. Ион натрия начинает ощутимо влиять при температурах ниже -10 ᵒС.

**Ключевые слова:**

*Криопэг, коррозионные свойства, химический состав, степень агрессивности*

**Введение**

Оценке коррозионной агрессивности мёрзлых грунтов посвящено достаточное количество публикаций [1,2,3,4, 5, 6]. В них указывается, что скорость коррозии материалов фундаментов и прочих коммуникаций в мерзлых грунтах может достигать скорости коррозии в талых дисперсных грунтах. В работе [7] указывается на специфику коррозии металлов во льду. В засоленных мерзлых породах коррозионная агрессивность их поровых растворов резко возрастает. Не меньшую значимость представляет коррозионная агрессивность высокоминерализованных низкотемпературных техногенных растворов, или криопэгов, на материалы фундаментов и подземных коммуникаций. Термин «криопэг» имеет в литературе неоднозначное толкование. Наиболее употребительным является, введенное Н.И. Толстихиным определение: «Криопэги (криогалинные воды) – природные соленые воды с отрицательными температурами» [8]. В такой трактовке этот термин рассматривается нами.

По данным Г.И. Дубикова и Н.В. Ивановой, область повсеместного распространения засоленных мерзлых грунтов и криопэгов Западной Сибири располагается севернее широты пос. Новый Порт на полуострове Ямал [9]. Криопэги характерны для всей криолитозоны полуострова. Они залегают на разной глубине в виде изолированных линз, не имеющих связи друг с другом, поверхностными и подземными водами. Засоленные мерзлые четвертичные породы Арктического побережья, имеют, как правило, морское происхождение, поэтому по своему химическому составу криопэги близки к морским водам, их минерализация составляет 10/160 г/л, состав хлоридно-натриевый с незначительным количеством сульфатов [10].

В нормативных документах, действующих на территории РФ, коррозионная агрессивность подземных вод определяется, преимущественно, по химическому составу, который при инженерных изысканиях определяется фрагментарно. Однако, как в криопэгах, так и поровых растворах засоленных пород, расположенных в слое годовых амплитуд, который вмещает фундаменты и подземные коммуникации, на стадиях строительства и эксплуатации сооружения могут происходить процессы криогенного метаморфизма. Это в первую очередь связано с периодическими изменениями естественного температурного режима слоя, а также влиянием различного рода механических и тепловых техногенных нагрузок (работа устройств термостабилизации грунта, тепловое влияние инженерного сооружения, изменение режима снегонакопления; и т.д). Под криогенным метаморфизмом природных вод понимается совокупность физико-химических процессов таких как: кристаллизация воды и плавление льда; осаждение и растворение солей; удаление и поглощение газов; изменение состояния солевых равновесий; образование ячеек льда с включенным в структуру рассолом; миграция воды и ионов за счет концентрационной диффузии и осмоса; адсорбция порового раствора на минеральной поверхности пород; ионный обмен и различного рода химические реакции [11]. Указанные процессы могут привести к существенному изменению исходного фазового и химического состава поровых растворов засоленных пород и криопэгов, который закладывается в проектную документацию, влияя на величину коррозионной агрессивности.

Сложности и многообразие химического состава природных засоленных растворов, крайне затрудняет экспериментальное исследование процессов криогенного метаморфизма при различных термобарических условиях. Так в лабораторных условиях подробно исследован это процесс только для морской воды. Натурные определения химического состава водных вытяжек и проб криопэгов носят, как правило, единичный (за сезон) характер. Это обуславливают целесообразность применения для исследования и прогноза изменения величин соответствующих характеристик других методов, в первую очередь, современных методов термодинамического моделирования.

Целью работы является разработка элементов методики оценки коррозионной агрессивности криопэгов полуострова Ямал, с учетом изменения фазового и химического состава криопэгов в зависимости от температуры, которое оценивается с помощью методов термодинамического и математического моделирования.

**Объект исследования и методика оценки коррозионной агрессивности**

В качестве объектов исследования были выбраны криопэги расположенные в верхних горизонтах криолитозоны полуострова Ямал. Их местоположение, концентрация и химический состав растворов приведены в работах [9, 12,13,14].

 Количественная оценка изменений фазового и химического состава криопэгов при изменении термобарических условий проводилась с использованием методов статистической термодинамики К. Питцера [15]. Моделирование поведения водно-солевых систем в области отрицательных температур сводится к расчету фазового состава систем различного валового химического состава, которые характеризуются определенной температурой Т и давлением Р. Равновесный состав системы находится методом минимизации свободной энергии Гиббса на множестве линейных ограничений, в виде системы уравнений баланса масс и электронейтральности. Для моделирования использовалась программа «FREEZEBRINE» [16, 17, 18, 19, 20].

Параметры, необходимые для расчета величин и представляют собой предмет базы термодинамических данных. База данных включает в себя следующие химические компоненты, которые могут быть образованы в системе : *раствор* (23 компонента), включающий катионы, анионы и нейтральные: Na, K, Ca, Mg, Cl, SO4, HCO3 , H2O(l), CaCO3,aq, MgCO3,aq, и др.; *твердые фазы* (56 компонентов): H2O(cr,I), NaCl ⋅ 2H2O, Na2SO4 ⋅10 H2O, Ca SO4 ⋅2 H2O, SYLVITE, CALCITE, MAGNESITE, HALITE, ANHYDRITE, DOLOMITE, ARAGONITE, SIDERITE, CaCl2⋅6H2O, MgCl2⋅6 H2O, Fe SO4⋅ 7 H2O и др.; *газы* (8 компонентов): H2O,g ,CH4,g, CO2,g, и др.

Входные данные в программу: исходная общая минерализация и концентрация основных компонентов химического состава пробы, полученные на основании химического анализа. Выходные данные: содержание воды, ионов и солей в жидкой, твердой и газообразной фазе; плотность и объемы фаз; осмотический коэффициент, ионная сила и рН растворов; химический потенциал и другие. Эти характеристики рассчитываются для определенного выбираемого диапазона температур или давлений с заданным шагом. Программа не учитывает некоторые химические реакции, типа восстановление сульфатов с образованием сульфидов и сероводорода, а также химическое взаимодействие порового раствора с породой. Однако следует иметь в виду, что при низких температурах скорости взаимодействия растворов с минералами вмещающих пород несопоставимо малы по сравнению со скоростями установления вводно-солевых и водно-газовых равновесий, а также с замерзанием или оттаиванием растворов, поэтому, на данном этапе развития термодинамической модели, породы полагаются относительно химически инертными. Кроме того, она не учитывает сульфатредукцию, снижающую содержание сульфат - иона в растворе, что может сказаться на коррозионной агрессивности, а также возможность нахождения в криопэге органических примесей (теория электролитов пока не позволяет такое объединение). Программа «FREEZBRINE» работает в различных режимах: «закрытые или открытые системы», «равновесная или фракционная кристаллизация», «промерзание-оттаивание», «изменение давления», «испарение-конденсация воды». Равновесная кристаллизация означает, что при изменении внешних условий (температуры или давления) все ранее образованные фазы системы (например, лед, соли, раствор электролита) могут взаимодействовать вновь между собой. Фракционная кристаллизация это когда мобильная фаза после частичной кристаллизации перемещается в другое место, отделяясь от ранее отложенных твердых фаз, либо раствор отделен от ранее образованных солей коркой льда, которая мешает им взаимодействовать, т.е. выходит из материального баланса рассола. При верификации программы использовались данные по пробам 60 криопэгов п-ова Ямал с морским типом засоления [12,17,21]. В СП 25.13330.2012 (приложение Б) [22] предложены приближенные инженерные соотношения для оценки температуры начала замерзания, фазового состава влаги, теплоемкости и коэффициента теплопроводности в засоленных породах, полученные путем статистической обработки экспериментальных данных и математического моделирования с помощью программы «FREEZEBRINE»[23].

На базе использования этой программы была также разработана методика прогноза изменения фазового и химического состава поровых растворов засоленных пород и криоэпгов при различных термобарических условиях, которая характеризует особенности процесса криогенного метаморфизма [14,17,18]. Существующие взгляды основаны на представлениях о закономерностях криогенного метаморфизма морской воды. Полученные результаты позволили выделить те же стадии криометаморфизма, что и для морской воды, с поправками на особенности формирования и условий криопэгов.

Поскольку речь идет о слое годовых амплитуд, то моделирование изменений фазового и химического состава криопэгов проводилось для случая, когда атмосферным давлением.

Оценка степени агрессивного воздействия низкотемпературных минерализованных растворов на бетон проводилась с учетом СП 28.13330.2017 [24]. Марки бетона по водопроницаемости и типу цемента принимались в соответствии с ГОСТ 22266-2014[25], ГОСТ 31108-2016[26] и ГОСТ 10178-85[27]. Для оценки коррозионной активности подземных вод к бетонам марок по водопроницаемости W4-12 используется ряд параметров, а именно: концентрации ионов: Na+, Mg2+, Cl-, SO42-, Ca2+, HCO3-, CO2, NH4+; водородный показатель и суммарное содержание анионов Cl-, SO42- при наличии испаряющих поверхностей.

На оболочки кабелей степень агрессивного воздействия производилась в соответствии с указаниями ГОСТ 9.602-2016[28]. Коррозионная агрессивность вод по отношению к свинцовым оболочкам кабелей определяется по ряду показателей: pH, общая жесткость, содержание органического вещества и нитрат иона.

**Полученные результаты и их обсуждение**

При понижении температуры раствора увеличивается концентрация ионов Na+, Mg2+, Cl-. Концентрация иона SO42- увеличивается до температуры -6 ᵒС. Затем, в связи с кристаллизацией мирабилита(Na2SO4∙10H2O), концентрация сульфат иона снижается (табл. 1).

*Таблица 1*

**Содержание ионов натрия, магния, хлора и сульфат ионов в замерзающих растворах, близких по исходному химическому составу к морской воде**

|  |  |
| --- | --- |
| Температура, ᵒС | Содержание ионов, г/л |
| Na+ | Mg2+ | Cl- | SO42- |
| 0 | 10,3 | 1,3 | 18,7 | 2,5 |
| -1 | 10,3 | 1,3 | 18,7 | 2,5 |
| -2 | 11,6 | 1,5 | 20,9 | 2,8 |
| -3 | 17,2 | 2,2 | 31,2 | 4,2 |
| -4 | 22,7 | 2,9 | 41,1 | 5,5 |
| -5 | 28,0 | 3,6 | 50,8 | 6,8 |
| -6 | 33,1 | 4,2 | 60,1 | 8,0 |
| -7 | 37,7 | 4,9 | 69,5 | 7,8 |
| -8 | 41,8 | 5,5 | 79,0 | 6,8 |
| -9 | 45,8 | 6,2 | 88,0 | 6,1 |
| -10 | 49,7 | 6,8 | 96,7 | 5,4 |
| -11 | 53,6 | 7,4 | 105,0 | 4,9 |
| -12 | 57,3 | 7,9 | 113,1 | 4,4 |
| -13 | 60,9 | 8,5 | 120,9 | 4,0 |
| -14 | 64,4 | 9,0 | 128,4 | 3,7 |
| -15 | 67,9 | 9,5 | 135,8 | 3,4 |
| -16 | 71,2 | 10,0 | 142,9 | 3,1 |
| -17 | 74,4 | 10,5 | 149,8 | 2,7 |
| -18 | 77,5 | 11,0 | 156,6 | 2,4 |
| -19 | 80,6 | 11,4 | 163,1 | 2,1 |
| -20 | 83,6 | 11,9 | 169,5 | 1,9 |

Границы концентрации различных ионов, при которых раствор можно отнести к различным степеням агрессивности к бетону, взяты из таблицы В.3 СП 28.13330.2017. При понижении температуры раствора, концентрация ионов возрастает, и степень агрессивности увеличивается.

Анализ содержания иона Mg2+ в криопэгах показывает, что при понижении температуры криопэга ниже -8,8 ᵒС, криопэг становится сильноагрессивным к маркам бетона W4-12. Концентрации иона Na+ позволяющие отнести криопэг к сильноагрессивным к маркам бетона W6-8 не достигаются в процессе его концентрирования. По отношению к бетонам марки W4 криопэг становится агрессивным при температуре ниже -19 ᵒС. Следует отметить, что на данный момент отсутствуют опубликованные данные о криопэгах столь низкой температуры.

По суммарному содержанию ионов Cl-, SO42- криопэги становятся сильноагрессивными к маркам бетона W6-8 при понижении температуры ниже -5,2 ᵒС. (табл.2).

Проанализированные криопэги не агрессивны к бетонам по содержанию ионов Ca2+, HCO3-, CO2, NH4+ в диапазоне температур от 0 до -20 ᵒС. Также, криопэги полуострова Ямал не агрессивны по водородному показателю pH.

*Таблица 2*

**Степень агрессивного воздействия низкотемпературных минерализованных растворов на бетон**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ионы | Марка бетона | Степень агрессивного воздействия  |
| Не агрессивная | Слабоагрессивная | Среднеагрессивная | Сильноагрессивная |
| Температура, ᵒС |
| Mg2+ | W4 | - | От 0 до -2,8 | От -2,8 до -4,2 | Ниже -4,2 |
| W6 | От 0 до -2,8 | От -2,8 до -4,2 | От -4,2 до -5,7 | Ниже -5,7 |
| W8 | От 0 до -4,2 | От -4,2 до -5,7 | От -5,7 до -7,2 | Ниже -7,2 |
| W10- W12 | От 0 до -5,7 | От -5,7 до -7,2 | От -7,2 до -8,8 | Ниже -8,8 |
| Na+  | W4 | От 0 до -10,0 | От -10,0 до -12,8 | От -12,8 до -19,0 | Ниже -19,0 |
| W6 | От 0 до -12,8 | От -12,8 до -19,0 | Ниже -19,0 | Не достигается  |
| W8 | От 0 до -19,0 | Ниже -19 | Не достигается | Не достигается  |
| Cl- и SO42- | W4 | - | - | - | Ниже 0 |
| W6 | - | - | От 0 до -4,4 | Ниже -4,4 |
| W8 | - | От 0 до -4,4 | От -4,4 до -5,2 | Ниже -5,2 |

Степень агрессивного воздействия сульфатов на бетон, в соответствии с таблицами В.4 и В.5 СП 28.13330.2017 учитывалась тремя различными способами: для криопэгов морских террас к маркам бетона W6-8; для криопэгов лайд к маркам бетона W6-8; для криопэгов террас и лайд к маркам бетона W10-W20.

Степень агрессивного воздействия сульфатов на бетоны марок по водопроницаемости W6-8 оценивается в зависимости от содержания иона HCO3-. Так как криопэги пойм и морских террас практически не содержат данного иона, а в криопэгах лайд гидрокарбонат ион присутствует, степени агрессивного воздействия сульфатов были проанализированы для криопэгов разных геоморфологических элементов. Так, криопэги поим и морских террас сильноагрессивны к бетонам на портландцементе при температуре от 0 ᵒС и ниже. По отношению к бетонам на шлакопортландцементе криопэги становятся сильно агрессивными при температуре ниже -5 ᵒС. Концентрации сульфат иона, позволяющие отнести раствор к сильноагрессивному, по отношению к бетонам, включающим в себя сульфатостойкие цементы, не достигаются в процессе концентрирования криопэгов(табл.3).

*Таблица 3*

**Степень агрессивного воздействия сульфатов низкотемпературных минерализованных растворов на бетон марок по водонепроницаемости W4-W8, применительно к поймам и морским террасам полуострова Ямал**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Материал | Марка бетона | Степень агрессивного воздействия  |
| Не агрессивная | Слабоагрессивная | Среднеагрессивная | Сильноагрессивная |
| Температура, ᵒ С |
| Портландцемент | W4 | - | - | - | Ниже 0 |
| W6 | - | - | - | Ниже 0 |
| W8 | - | - | - | Ниже 0 |
| Шлакопортланд цемент  | W4 | - | От 0 до -2 | От -2 до -2,9 | Ниже -2,9 |
| W6 | - | От 0 до -2,8 | От -2,8 до -3,8 | Ниже -3,8 |
| W8 | От 0 до -1,8 | От -1,8 до -4,1 | От -4,1 до -5 | Ниже -5 |
| Сульфатостойкие цементы | W4 | От 0 до -2,2 | От -2,2 до -4,4 | От -4,4 до -6 | Ниже -6 |
| W6 | От 0 до -2,9 | От -2,9 до -5,8 | Ниже -5,8 | Не достигается |
| W8 | От 0 до -3,7 | Ниже -5,8 | Не достигается | Не достигается |

Криопэги лайд и территорий, периодически затапливаемых морем, достигают сильноагрессивной степени воздействия на бетоны марок W6-8 на портландцементе при температуре -1,8 ᵒС. Для бетонов на шлакопортланд цементе марки W4 криопэги становятся сильноагрессивными при температуре -4,4 ᵒС. Для бетона с тем же цементом, но марки W8, в процессе концентрирования концентрация сульфат иона не достигает значений, позволяющих отнести данный криопэг к сильноагрессивным. По отношению к бетонам с сульфатостойким цементом, криопэги лайд остаются неагрессивными или слабо агрессивными в диапазоне температур от 0 до -20 ᵒС (табл.4).

*Таблица 4*

**Степень агрессивного воздействия сульфатов низкотемпературных минерализованных растворов на бетон марок по водонепроницаемости W4-W8, применительно к лайдам полуострова Ямал**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Материал | Марка бетона | Степень агрессивного воздействия  |
| Не агрессивная | Слабоагрессивная | Среднеагрессивная | Сильноагрессивная |
| Температура, ᵒС |
| Портландцемент | W4 | - | - | - | Ниже 0 |
| W6 | - | - | - | Ниже 0 |
| W8 | - | - | От 0 до -1,8 | Ниже -1,8 |
| Шлакопортланд цемент  | W4 | От 0 до -2,9 | От -2,9 до -3,6 | От -3,6 до -4,4 | Ниже -4,4 |
| W6 | От 0 до -3,8 | От -3,8 до -4,8 | От -4,8 до -5,8 | Ниже -5,8 |
| W8 | От 0 до -5 | От -5 до -6,4 | Ниже -6,4 | Не достигается |
| Сульфатостойкие цементы | W4 | От 0 до -6 | Ниже -6 | Не достигается | Не достигается |
| W6 | Ниже 0 | Не достигается | Не достигается | Не достигается |
| W8 | Ниже 0 | Не достигается | Не достигается | Не достигается |

По отношению к бетонам марок по водопроницаемости W10-W20 криопэги Ямала могут быть сильноагрессивными только к бетонам на портландцементе марок W10-14. К бетонам на шлакопортландцементе и сульфатостойкихцементах, в процессе концентрирования содержание сульфат иона не достигает значений, требующего отнести криопэг к сильноагрессивным по степени воздействия(табл.5).

*Таблица 5*

**Степень агрессивного воздействия сульфатов низкотемпературных минерализованных растворов на бетон марок по водонепроницаемости W10-W20**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Материал | Марка бетона | Степень агрессивного воздействия  |
| Не агрессивная | Слабоагрессивная | Среднеагрессивная | Сильноагрессивная |
| Температура, ᵒ С |
| Портландцемент | W10-14 | - | - | От 0 до -1,8 | Ниже -1,8 |
| W16-20 | - | От 0 до -1,8 | Ниже -1,8 | Не достигается |
| Шлакопортланд- цемент  | W10-14 | От 0 до -3,7 | От -3,7 до -6 | Ниже -6 | Не достигается |
| W16-20 | От 0 до -6 | Ниже -6 | Не достигается | Не достигается |
| Сульфатостойкие цементы | W10-14 | Не достигается | Не достигается | Не достигается | Не достигается |
| W16-20 | Не достигается | Не достигается | Не достигается | Не достигается |

Исходя из анализа концентрации ионов криопэга, при понижении температуры можно сделать вывод, что криопэги остаются неагрессивными по отношению к алюминиевым оболочкам кабелей в диапазоне температур от 0 до -20 ᵒС.

Коррозионная агрессивность вод по отношению к свинцовым оболочкам кабелей в соответствии с ГОСТ 9.602-2005, определяется по: pH, ионам железа и хлора. По содержанию хлор иона, криопэги полуострова Ямал являются сильно агрессивными к свинцовым оболочкам кабеля при температурах от 0 до -20 ᵒС.

**Выводы**

1. При оценке коррозионной агрессивности криопэгов к материалам фундамента и подземных коммуникаций необходимо учитывать процессы криогенного метаморфизма, которые связаны с возможным изменением температурного режима в слое годовых амплитуд для периода строительства и эксплуатации инженерного сооружения.

2. При понижении температуры криопэгов их коррозионная агрессивность может существенно возрастать.

3. Особенного внимания требуют сульфат ион и ион магния, так как их концентрация может резко возрастать, при понижении температуры, тем самым изменяя степень агрессивности криопэгов на 1-2 пункта.

4. Данная работа является одной из первых, количественно обосновывающих необходимость учета возможных изменений коррозионной агрессивности криопэгов при реализации процессов криогенного метаморфизма, необходимы дальнейшие исследования.

**Список литературы**

1. Баулин В.В., Аксенов В.И., Дубиков Г.И. и др. - Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала, Том. 2. Институт СО РАН Тюмень, 1996.
2. Великоцкий М. А. Коррозионная активность грунтов в различных природных зонах. // Вестник Московского университета, Серия 5: География, -2010. -№ 1, -С. 21-27.
3. Великоцкий М. А., Егурцов С. А. К проблеме оценки коррозионной активности многолетнемерзлых грунтов котолитозоны. // Криосфера Земли, -2008. -Том 12, № 3, -С. 50-57.
4. Великоцкий М. А., Марахтанов В. П. Новые критерии выявления коррозионной опасности северных ландшафтов для магистральных газопроводов. // Газовая промышленность, -2013. -№ 2, -С. 55-58.
5. Притула В.В. Потенциал ЗАО «ВНИИСТ» для обеспечения коррозионно-промышленной безопасности объектов ТЭК. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. -2015. -№ 1 (47). -С. 21-27.
6. Shimanov A., Stanilovskaya J., Komarov I. Phase composition and chemical properties of saline soils on the Arctic coast of Russia. // International Conference “Solving the puzzles from Cryosphere, Pushchino, Russia, -2019. -p.136-137.
7. Shavlov, A.V., Ryabtseva, A.A. The mechanism of metal corrosion acceleration in ice caused by structural transformations and crystallization of water. // Russian Journal of Physical Chemistry. -2007. №81, -p.1035-1040.
8. Толстихин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. -Госгеолиздат Москва,1941.
9. Дубиков Г.И., Иванова Н.В. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР. В сб.: Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, 144 с.
10. Брушков А.В.1998. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства. М.: Изд-во МГУ. 330 с.
11. Иванов А.В.Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988, 163 с
12. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложнеий центрального Ямала // Криосфера Земли. -2002. -Т. 6. №3. -С. 15–24.
13. Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. -1999. -Т. 3, № 2. -С. 40–65.
14. Shimanov A.A., Komarov I.A., Kireeva T.A., Peculiarities of the Changes in Chemical Composition of Cryopegs of the Yamal Peninsula during Cryogenic Concentration. // Moscow University Geology Bulletin. -2020. -Vol. 75, No. 1, -p. 72-79.
15. Pitzer K.S. A thermodynamic model for aqueous solutions of liquid-like density. Reviews in Mineralogy. -1987., -pp. 97-142.
16. Комаров И.А., Мироненко М.В. Моделирование водно-ионного состава засоленных мерзлых пород и криопэгов при изменение термобарических условий// Актуальные направления развития прикладной математики в энергетике и информационно-коммуникационных технологиях, место издания Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 с. 23-29.
17. Кияшко Н.В., Комаров И.А. О некоторых закономерностях криогенного метаморфизма криопэгов п-ова Ямал. Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», Томск, 2012.с.451–454
18. Комаров И. А., Волков Н.Г. Методика прогноза температурного и водно-ионного состав засоленных пород и криопэгов. Проблемы строительства на засоленных грунтах. 2007. с. 147-183.
19. Мироненко М.В., Поляков В.Б. Об алгоритме расчета равновесного состава водно-солевых систем на основе модели Питцера. // Геохимия. -2009. -№ 10, -С. 1103-1107.
20. Komarov I.A., Kiyashko N.V. 2012. Method for estimating propeties of cryopegs from the Yamal Peninsula // Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost,, Salekhard, 2, 2012. рр. 169-174.
21. Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. - Научный мир, Москва, 2010.
22. СП 25.13330.2012. 2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Строительные нормы и правила (СНИП -2012), Москва.
23. Комаров И.А., Мироненко М.В., Кияшко Н.В. Совершенствование нормативной базы по расчетной оценке теплофизических свойств засоленных пород и криопэгов. // Основания, фундаменты и механика грунтов. -2012. -№ 2, -С. 25-30.
24. СП 28.13330. 2017 "Защита строительных конструкций от коррозии
25. ГОСТ 22266-2014 Цементы сульфатостойкие. Технические условия.
26. ГОСТ 31108-2016 Цементы общестроительные. Технические условия
27. ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия (С Изменениями N 1, 2).
28. ГОСТ 9.602- 2016 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.