

УДК 551.345

А.А. Шиманов¹, И.А. Комаров², Т.А. Киреева³

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КРИОПЭГОВ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ В ПРОЦЕССЕ КРИОГЕННОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ

*ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1*

Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Проанализирован ионный состав легкорастворимых солей криопэгов с разной минерализацией на полуострове Ямал. Выявлены закономерности изменения химического состава вод криопэгов в процессе криогенного метаморфизма. Соотношения макрокомпонентов химического состава криопэгов позволяют сделать вывод, что генезис исходных растворов был различным — морским и инфильтрационным.

Ключевые слова: криопег, химический состав, концентрирование, макрокомпоненты, кристаллизация солей, Ямал.

The analysis of the content of ions in cryopeg different mineralization of the Yamal Peninsula. The regularities of changes in the chemical composition of cryopeg waters in the process of cryogenic metamorphism are revealed. The ratios of the macro-components of the chemical composition of cryopegs allow us to conclude that the genesis of the initial solutions was different: marine and infiltration.

Key words: cryopeg, chemical composition, concentration, ion content, salt crystallization, Yamal.

Введение. Тематика работы направлена на решение одной из проблем геокриологии — выявление закономерностей криогенного метаморфизма криопэгов морского типа засоления в процессе изменения термобарических условий, включая промерзание—оттаивание. Под криогенным метаморфизмом природных вод мы понимаем совокупность физико-химических процессов, включающих такие явления, 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, перераспределение солей между твердой и жидкой фазами воды. Промерзание песчаных пород сопровождается, как правило, частичным отжиманием порового раствора из зоны кристаллизации и его концентрированием. Процесс криогенного концентрирования может приводить к образованию линз высокоминерализованных отрицательно-температурных подземных вод — криопэгов — природных соленых вод с отрицательными значениями температуры [Толстыхин, 1941]. В статье не рассматриваются процессы взаимодействия раствора с вмещающими породами.

Многообразие химического состава криопэгов природных засоленных растворов и их минерали-

зации крайне затрудняют экспериментальное исследование процессов криогенного метаморфизма при различных термобарических условиях. Так, в лабораторных условиях подробно исследован этот процесс только для морской воды [Гитерман, 1937; Доронин, Хасин, 1975; Жигарев, 1997; Nelson, Thompson, 1954]. Натурные определения химического состава легкорастворимых солей криопэгов носят, как правило, единичный (за сезон) и фрагментарный характер [Крицук, 2010; Фотиев, 1999; Савельев, 1971]. Выявление закономерностей криогенного метаморфизма позволяет разработать более обоснованные методики проведения прогнозных и эпигнозных (палеореконструкции) оценок температурного и водно-ионного режима засоленных пород, определяющего состояние и эволюцию ряда районов криолитозон России (зоны шельфа северных морей, приморские низменности), которые в настоящее время интенсивно осваиваются, в первую очередь как газо- и нефтеносные районы (п-ов Ямал, шельф Северного Ледовитого океана и т.д.).

Объект исследования и методы его изучения. Объектом исследования были криопэги п-ова Ямал с морским типом химического состава, химический состав которых и условия залегания приведены в работах [Крицук, 2010]. Под

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, аспирант; e-mail: inferit90@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, профессор; e-mail: ilya_komarov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра гидрогеологии, доцент; e-mail: ta_kireeva@mail.ru

Таблица 1

Химический состав криопэгов полуострова Ямал, по [Крицук, 2010]

№ образца	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁻ +K ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	M, г/л	Структурный элемент
	г/л							эквивалент-%						
1	1,18	4,98	34,52	1,22	1,92	68,02	3	21	76	1	2	97	111,8	Лайды
2	1,18	3,53	25,67	0,92	2,11	50,02	4	20	76	1	3	96	83,4	
3	1,30	3,90	28,36	0,98	6,24	52,43	4	20	76	1	8	91	93,2	
4	0,72	4,07	32,41	1,10	7,73	57,01	2	19	79	1	9	90	103	
5	0,00	0,25	11,66	0,00	2,54	16,86	0	4	96	0	10	90	31,3	
6	0,84	3,16	24,86	0,85	6,00	44,30	3	19	78	1	9	90	80	
7	0,76	3,22	22,29	1,53	2,45	42,53	3	21	76	2	4	94	72,8	
8	1,04	3,60	21,92	0,79	6,29	41,25	4	23	73	1	10	89	74,9	
9	1,06	4,02	31,67	1,10	4,22	58,93	3	19	78	1	5	94	101	
10	0,24	0,73	26,36	0,00	1,78	42,00	1	5	94	0	3	97	71,1	
11	1,70	2,66	32,22	0,00	4,08	57,62	5	13	82	0	5	95	98,3	
12	1,12	3,01	25,05	0,00	4,03	46,61	4	18	78	0	6	94	79,8	
13	0,46	1,30	10,07	0,00	12,58	10,90	4	19	77	0	5	95	35,3	
14	0,10	0,18	3,04	0,00	0,82	4,79	3	10	87	0	11	89	9,1	
15	0,64	4,07	28,61	0,00	2,30	55,63	2	21	77	0	3	97	91,9	
16	0,62	5,04	25,07	0,00	0,77	54,71	2	27	70	0	1	99	86,4	
17	1,78	4,56	18,38	0,00	0,00	45,01	7	30	63	0	0	100	69,7	
18	1,54	2,26	13,52	0,00	0,00	30,28	9	22	69	0	0	100	47,6	
19	2,44	6,05	20,72	0,00	0,72	53,68	8	33	59	0	1	99,0	83,8	
20	0,36	0,56	1,08	0,00	0,00	4,01	16	42	42	0	0	100	6,02	
21	3,26	3,68	7,52	0,00	0,48	33,76	17	32	34	0	1	99	48,8	
22	0,56	2,84	15,69	0,00	1,82	32,31	3	25	72	0	4	96	53,7	
23	0,58	3,79	25,07	0,00	1,39	49,91	2	22	76	0	2	98	81,1	
24	0,00	1,78	22,72	0,00	0,00	40,29	0	13	87	0	0	100	64,8	
25	0,54	2,68	14,74	0,24	1,10	30,67	3	25	72	0,4	2,6	97	50,2	
26	1,14	5,65	31,21	0,81	0,91	61,52	3	25	72	7	1	92	107	
27	0,42	0,94	7,20	0,00	0,19	14,45	5	19	76	0	1	99	23,25	
28	0,34	1,36	9,98	0,00	1,87	18,60	3	20	77	0	7	93	32,7	Поймы
29	0,62	2,23	12,81	0,00	0,72	26,91	4	24	72	0	2	98	43,5	
30	1,06	2,77	13,87	0,00	0,43	31,17	6	26	68	0	1	99	49,4	
31	0,30	1,18	8,65	0,00	0,24	17,18	3	20	77	0	1	99	27,6	
32	0,20	0,70	6,33	0,85	0,14	11,61	3	17	80	4	1	95	19,7	
33	0,28	1,00	8,35	0,31	0,24	15,98	3	18	79	1	1	98	26,1	
34	1,06	2,44	11,41	0,00	0,10	26,59	7	27	66	0	0,3	99,7	41,6	
35	0,08	0,19	1,98	0,24	0,19	3,48	4	15	81	4	4	92	6,2	
36	0,30	1,72	8,12	0,00	0,24	17,96	3	28	69	0	1	99	28,4	
37	3,80	3,22	9,36	0,00	0,43	30,42	22	31	47	0	1	99	47,34	
38	2,04	1,98	6,92	0,00	0,29	19,99	18	29	53	0	1	99	31,3	
39	1,34	2,10	9,89	0,00	0,00	23,86	10	26	64	0	0	100	37,2	
40	0,00	1,58	17,20	0,00	0,00	31,24	0	15	85	0	0	100	50	
41	6,82	4,22	9,36	0,67	0,00	38,66	31	32	37	1	0	99	59,6	

морским типом химического состава криопэгов подразумеваются соленые воды и рассолы хлоридно-натриево-магниевого состава, содержащие в значительном количестве MgCl₂ — соль морского генезиса. Нами для изучения условий криогенного преобразования исходных растворов и выявления их генезиса использованы опубликованные данные о химическом составе 41 криопэга, которые расположены в пределах одного региона. Наличие

представительной выборки данных о химическом составе проб криопэгов, находящихся в схожих геологических условиях, но с разной минерализацией, позволяет выявить особенности изменения химического состава поровых растворов при их промерзании.

В геологическом строении рассматриваемой территории выделяют палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения. Последние, к которым

приурочены изучаемые криопэги, представлены палеогеновыми и четвертичными отложениями. Отложения палеогена имеют мощность до 100 м и представлены прибрежно-морскими фациями переслаивающихся алевролитов, алевритистых глин и песков. Мощность четвертичных отложений изменяется от 10–20 до 250–300 м. Они представлены глинами суглинистыми и песчаными разностями, имеющими морской генезис [Трофимов, 1975].

Исследованные криопэги расположены в разрезах трех геоморфологических уровней — лайдах, поймах и террасах (рис. 1). Химический состав криопэгов, определенный согласно ГОСТ 26449.1-85 и ГОСТ 26449.2-85, приведен в табл. 1.

Криопэги находились на глубине от 20–30 до 100–150 м. Криопэги лайд — безнапорные воды и расположены на глубине от 1,6 до 9,8 м, их минерализация изменяется в пределах 80–120 г/л, т.е. по величине минерализации они относятся к рассолам. На поймах криопэги встречены на глубине 5,8–12,0 м, это слабонапорные воды, с минерализацией в интервале 6,2–91,9 г/л, т.е. относятся как к рассолам (минерализация >50 г/л), так и к соленым водам. Криопэги морских террас зафиксированы на глубине 2,5–11 м, с минерализацией 6,2–42,5 г/л, относятся к соленым водам. Химический состав большинства исследованных линз криопэгов в разрезах всех геоморфологических уровней хлоридно-натриево-магниевый, с содержанием Mg^{2+} от 13 до 31 экв.-% (табл. 1). Однако три образца криопэгов лайд при значительной величине минерализации (до 98,3 г/л) имеют пониженное содержание Mg^{2+} : 4, 5 и 13 экв.-% (табл. 1) и, таким образом, относятся к хлоридно-натриевым соленым водам и рассолам. Аналогично пониженное содержание иона Mg^{2+} (10 экв.-%) характерно для одного образца криопэгов пойм, имеющего минерализацию 9,1 г/л и также по преобладающим ионам относящегося к соленым водам хлоридно-натриевого состава (табл. 1).

Результаты исследований и их обсуждение. Для исследования изменений химического состава криопэгов при замерзании были построены и проанализированы зависимости концентрации ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- от общей минерализации раствора. Кроме того, для качественной оценки генезиса вод криопэгов выполнено сравнение данных о химическом составе криопэгов с химическим составом океанической воды и химическими составами растворов, образующихся при поверхностном концентрировании океанической воды, содержание макрокомпонентов (г/л и экв.-%) которой приведены в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных о химическом составе криопэгов проводили с учетом гипотезы об идентичности влияния процессов испарения и промерзания на потенциал поровой влаги. Так, в работе [Комаров, 2003] качественное и количественное сопоставление динамики про-

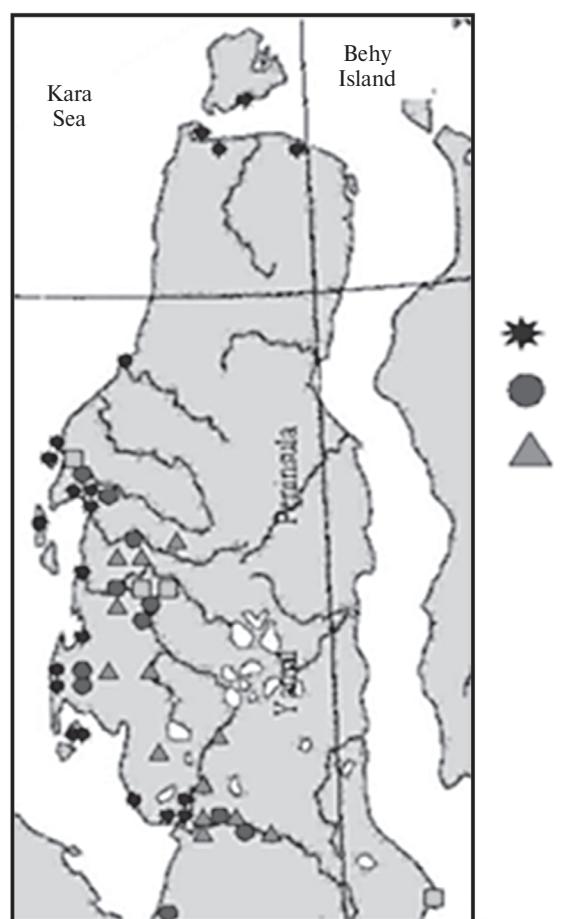


Рис. 1. Схема расположения исследованных криопэгов по [Streletskaia, Kristsuk, 2004]: 1 — лайды, 2 — поймы, 3 — террасы

цессов промерзания и иссушения, представленное в предельно обобщенном виде в виде критериальных уравнений, однозначно свидетельствует об аналогичности этих процессов.

Исходя из того что физический смысл испарительного и криогенного концентрирования схож — при испарении вода уходит в паровую фазу, остаточный раствор концентрируется, а при промерзании вода уходит в твердую фазу, что также сопровождается концентрированием остаточного раствора, мы опирались на закономерности изменения растворов при испарительном концентрировании. Известно, что по мере испарительного концентрирования грунтовых вод из них последо-

Таблица 2

Содержание макрокомпонентов в океанической воде
[Хорн, 1972]

Ион	г/л	Эквивалент-%
Na+K	10,8	79
Mg	1,3	17
Ca	0,4	4
Cl	19,4	90
SO ₄	2,7	9
HCO ₃	0,1	1

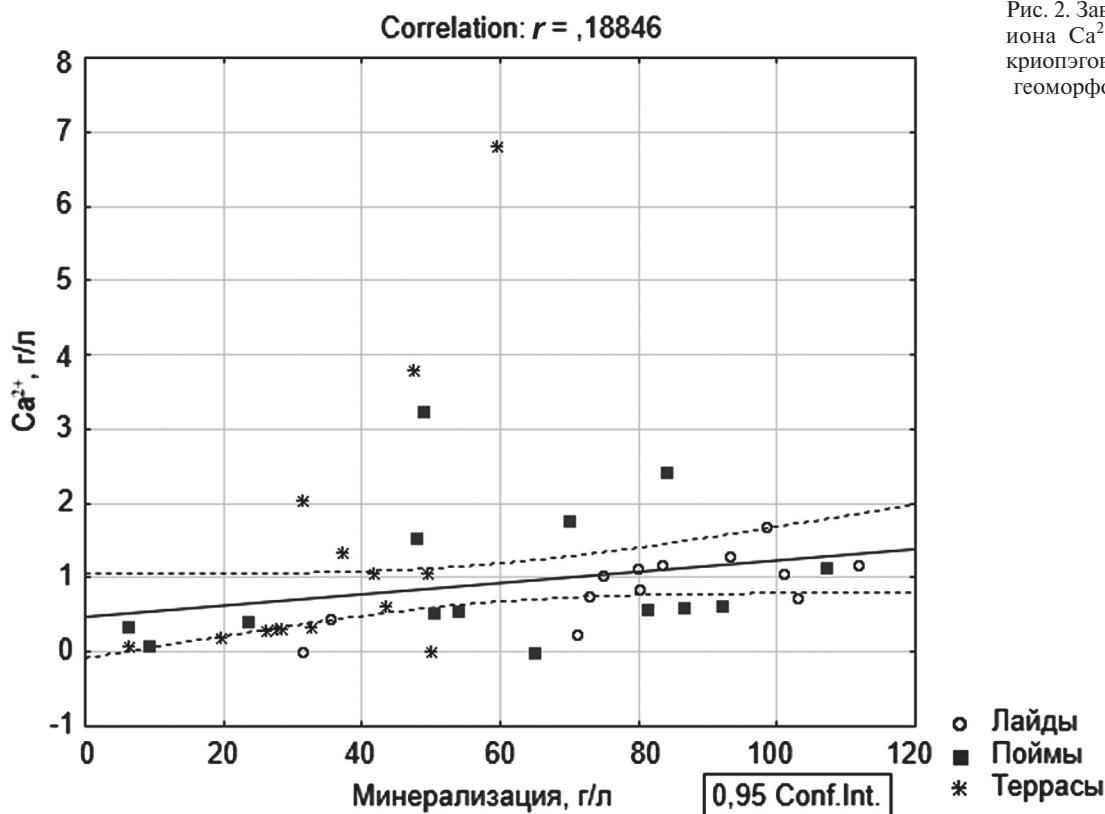


Рис. 2. Зависимость содержания иона Ca^{2+} от минерализации криопэгов в отложениях разных геоморфологических уровней

вательно осаждаются сначала менее растворимые соли, а затем все более растворимые. Последовательность отложения солей из почвенно-грнтовых вод следующая: оксиды алюминия, железа, марганца (Al_2O_3 , Fe_3O_4 , MnO_2), SiO_2 и силикаты, фульваты и фосфаты, CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, CaSO_4 , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , NaCl , KCl , MgCl_2 , NaNO_3 , KNO_3 [Ковда, 1946]. При этом химический состав результирующего рассола будет зависеть от химического состава исходного раствора.

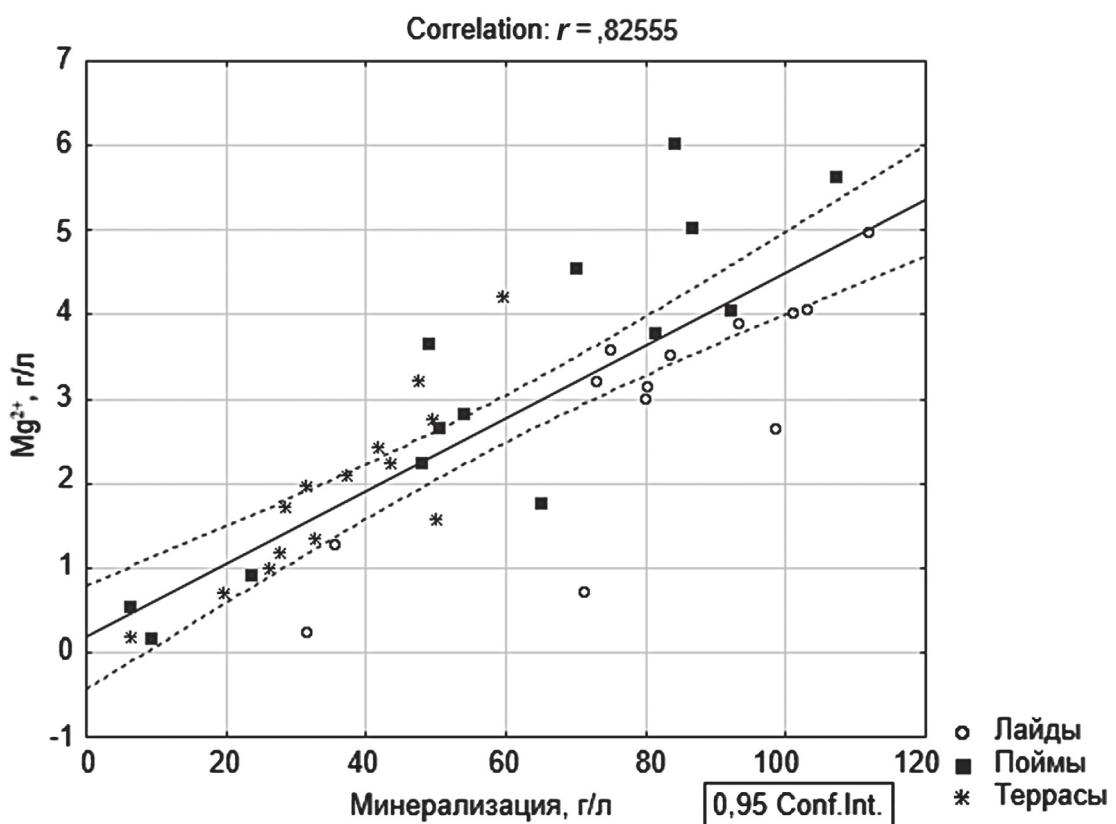
Так, при вымораживании маломинерализованных подземных вод с минимальным содержанием Ca^{2+} формируются минерализованные щелочные воды $\text{HCO}_3\text{-Na}$ состава. При концентрировании вод атмосферного генезиса, имеющих минерализацию до 1 г/л и в основном $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ состав, образуются сульфатно-натриевые растворы, а затем хлоридно-натриевые рассолы [Ковда, 1946]. При концентрировании океанической воды, имеющей минерализацию 35 г/л и хлоридно-натриево-магниевый состав (табл. 2), формируются сульфатно-натриевые растворы, а затем рассол хлоридно-магниевого состава [Крайнов и др., 2004]. Такие различия в составе результирующего рассола связаны с компонентным составом исходного раствора, который по мере концентрирования преобразуется согласно принципу разделения Харди–Эгстера, который формулируется в работе [Дривер, 1985]: «Испарение будет приводить к увеличению содержания иона, присутствующего в растворе в более высокой относительной концентрации, и к снижению содержания иона,

присутствующего в более низкой относительной концентрации». Таким образом, если в рассоле в катионном комплексе преобладает магний, то, следовательно, исходным раствором была вода морского генезиса; если преобладает натрий — то исходный раствор имел инфильтрационное происхождение. Эти закономерности нашли подтверждение при исследовании криопэгов п-ова Ямал и позволили предположительно определить генезис исходного раствора криопэгов.

Проанализировав зависимости содержания иона Ca^{2+} от минерализации криопэга (рис. 2), можно сделать вывод, что при криогенном концентрировании растворов ион Ca^{2+} практически не накапливается в растворе. Это обусловлено тем, что ион Ca^{2+} при наличии ионов HCO_3^- и SO_4^{2-} образует слаборасторимые соли: кальцит (CaCO_3), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а в случае высокой минерализации раствора — ангидрит (CaSO_4). Таким образом, при промерзании растворов, близких по химическому составу к морской воде, ион Ca^{2+} , по аналогии с поверхностным концентрированием не будет накапливаться в растворе. Ион Ca^{2+} начинает накапливаться в пластовых условиях на значительной глубине (1–2 км), когда в пластовых водах уже практически отсутствуют ионы HCO_3^- и SO_4^{2-} . В этих условиях ион Ca^{2+} накапливается в составе хлорида кальция (CaCl_2), имеющего растворимость 745,0 г/дм³ при нормальных условиях и в природных условиях не выпадающего в осадок.

В большей части образцов криопэгов выявлена прямая зависимость содержания иона Mg^{2+} от ми-

Рис. 3. Зависимость содержания иона Mg^{2+} от минерализации криопэгов в отложениях разных геоморфологических уровней



нерализации (рис. 3), т.е. в заданном интервале минерализации криопэгов накапливается ион Mg^{2+} , что связано с высокой растворимостью солей Mg^{2+} , а также, видимо, с преобладанием Mg^{2+} над Ca^{2+} в исходном растворе. Это проявляется в 37 образцах (93% коллекции) и соответствует минерализации от 6 до 112 г/л и содержанию Mg^{2+} от 17 до 42 экв.-%. В криопэгах такого химического состава Mg^{2+} может образовывать минерал бишофит ($MgCl_2$), кристаллизующийся при минерализации около 550 г/дм³. Для образования таких солей, как магнезит ($MgCO_3$), не достаточно HCO_3^- -иона, так как первоначально весь HCO_3^- -ион будет связан ионом Ca^{2+} . Карналлит ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$) будет кристаллизоваться при концентрации, превышающей концентрацию кристаллизации галита [Крайнов и др., 2004]. Анализ зависимости содержания иона Mg^{2+} от минерализации криопэга показывает, что при криогенном концентрировании изменение химического состава раствора проходит по сценарию, аналогичному поверхностному испарению, т.е. рассолы хлоридно-натриево-магниевого состава сформировались при концентрировании вод морского генезиса. Большая часть криопэгов образовалась при концентрировании морской воды, так как содержание в них иона Mg^{2+} (в экв.-%) больше либо равно содержанию этого иона в морской воде (табл. 1, 2).

Однако в 4 образцах трех криопэга лайд, обр. № 5, 10, 11 и одного криопэга поймы (обр. № 14), что соответствует 7% коллекции, установлено пониженное значение иона Mg^{2+} : от 4 до 13 экв.-

%. При этом их результирующая минерализация при криогенном концентрировании показывает величины аналогичные таковым при концентрировании растворов, имеющих содержание Mg^{2+} , близкое к содержанию в морской воде. Это свидетельствует о том, что эти криопэги являются результатом концентрирования не морского исходного раствора, а воды инфильтрационного генезиса, в которой магний и кальций находятся в резко подчиненном количестве по отношению к натрию, в результате чего образовался рассол хлоридно-натриевого состава с преобладанием соли $NaCl$ (табл. 1).

Ион Na^+ накапливается в линзах криопэгов в разрезах всех геоморфологических элементов (рис. 4). Снижение содержания этого иона может быть связано с образованием мирабилита ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$), но криопэги этого химического состава не содержат ион SO_4^{2-} в необходимом количестве. Кроме того, экспериментально показано [Цуриков, 1976], что при концентрировании морской воды при температуре около $-21^\circ C$ образуется галит ($NaCl$), но на рассматриваемой территории не зафиксированы криопэги с такой температурой.

В большинстве проанализированных криопэгов (14 образцов и 34% коллекции) не накапливается ион HCO_3^- . Это объясняется образованием кальцита ($CaCO_3$). Тем не менее из данных табл. 1 следует, что максимальное содержание HCO_3^- (4 и 7 экв.-%) фиксируется в разрезах морских террас и пойм. Ряд криопэгов лайд (8 образцов и 20%

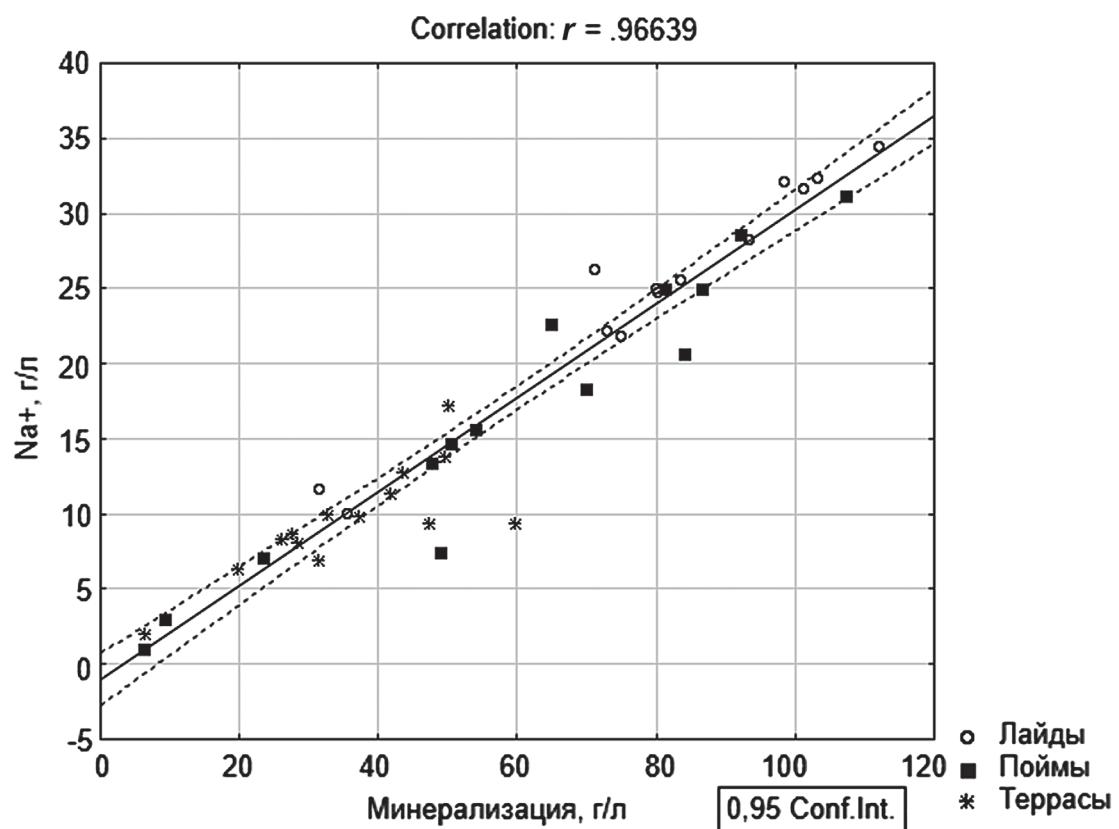


Рис. 4. Зависимость содержания иона Na^+ от минерализации криопэгов в отложениях разных геоморфологических уровней

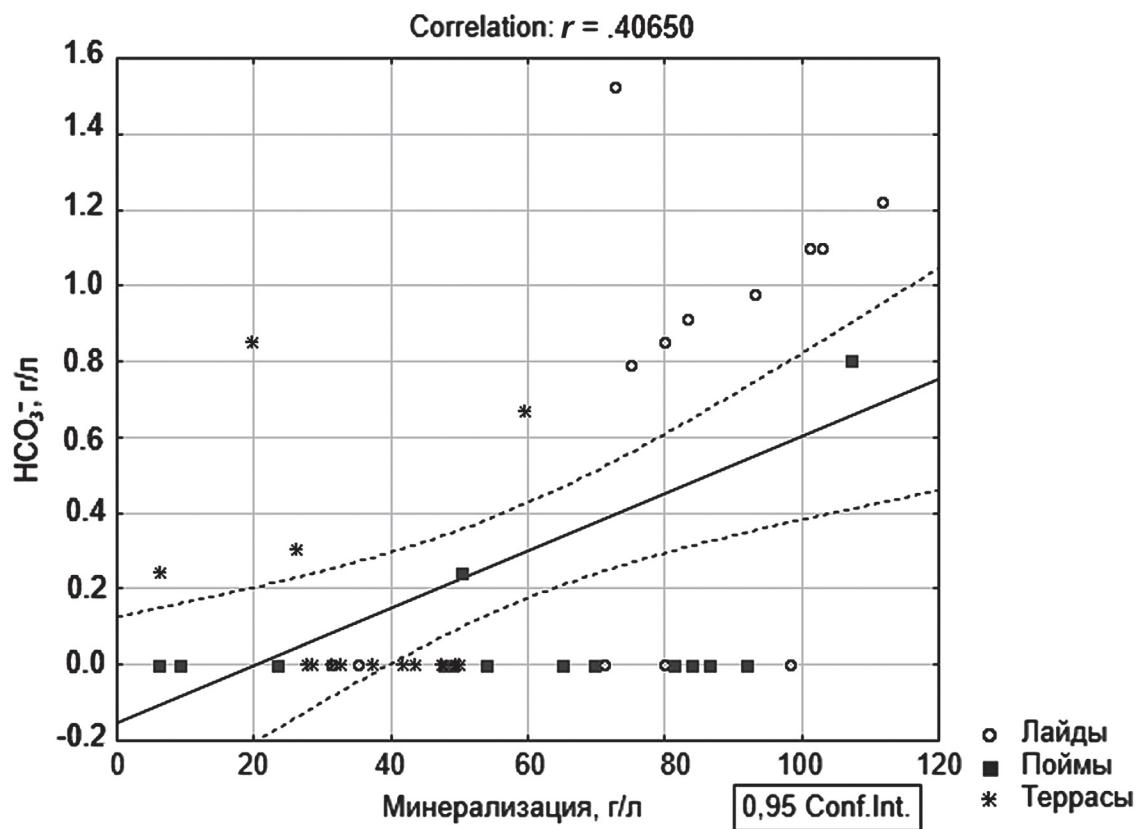


Рис. 5. Зависимость содержания иона HCO_3^- от минерализации криопэгов в отложениях разных геоморфологических уровней

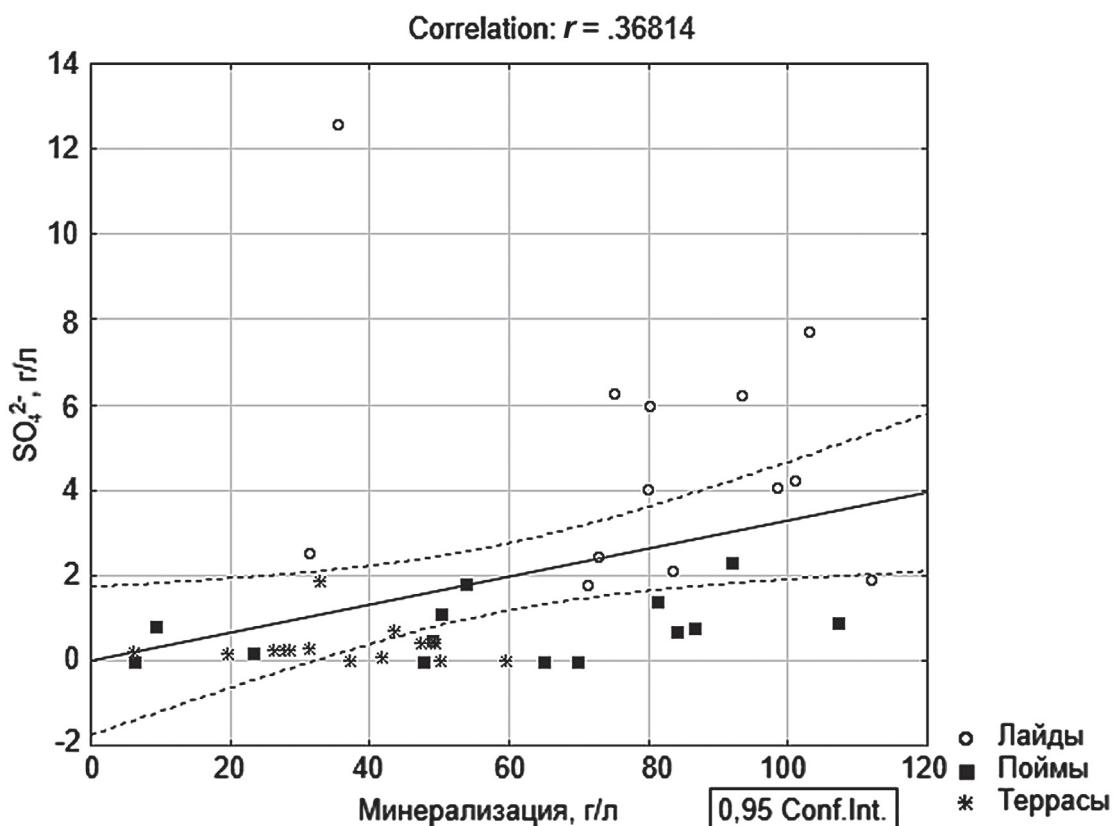


Рис. 6. Зависимость содержания иона SO_4^{2-} от минерализации криопэгов в отложениях разных геоморфологических уровней

коллекции) также имеет повышенное содержание иона HCO_3^- (до 2 экв.-%) (рис. 5). Очевидно, что это связано с повышенным содержанием Na^+ в исходном растворе и накоплением HCO_3^- в виде соли NaHCO_3 .

Ион SO_4^{2-} не накапливается в этих криопэгах (рис. 6). Это объясняется образованием солей гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), а в случае повышения минерализации раствора — ангидрита (CaSO_4). Снижение содержания иона SO_4^{2-} может быть обусловлено процессом сульфатредукции. В таком случае будет наблюдаться пиритизация песчаных отложений, к которым приурочен криопэг, вследствие взаимодействия образующегося H_2S с оксидами железа, содержащимися в породе.

Анализ содержания иона Cl^- показывает, что этот ион накапливается в криопэгах всех структурных элементов (рис. 7). Экспериментальные работы [Цуриков, 1976] показывают, что при понижении температуры раствора до $-21,5^\circ\text{C}$ из раствора будет кристаллизоваться галит (NaCl), но такие значения температуры пород не характерны для территории п-ова Ямал. При дальнейшей концентрации ион Cl^- может образовываться карналлит ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и бишофит (MgCl_2).

Заключение. Изучение химического состава криопэгов п-ова Ямал, показало, что изменение химического состава растворов при промораживании происходит по закономерностям, схожим

с концентрированием поверхностных и грунтовых вод при испарении.

Анализ содержания ионов в исследованных криопэгах выявил прогрессивное накопление ионов Mg^{2+} , Na^+ и Cl^- при возрастании минерализации. Ионы Ca^{2+} , HCO_3^- и SO_4^{2-} не накапливаются в криопэгах высокой минерализации ($>31-35$ г/л), что связано с образованием кальцита, гипса и ангидрита.

Большая часть (93% коллекции) криопэгов рассматриваемой территории образовалась при концентрировании исходной воды морского генезиса, о чем свидетельствует прогрессивное накопление магния в рассолах с образование рассолов хлоридно-натриево-магниевого состава.

Ряд образцов (7% коллекции) криопэгов лайд и пойм сформировались при концентрировании инфильтрационных поверхностных вод, о чем свидетельствует пониженное содержание в рассолах магния относительно океанической воды и формирование результирующих хлоридно-натриевых растворов аналогичной минерализации.

В одном случае генезис исходных вод криопэгов лайд предполагается как смешанный инфильтрационно-морской, о чем свидетельствует образование сульфатно-хлоридно-натриевого раствора с относительным содержанием магния, аналогичным содержанию в морской воде.

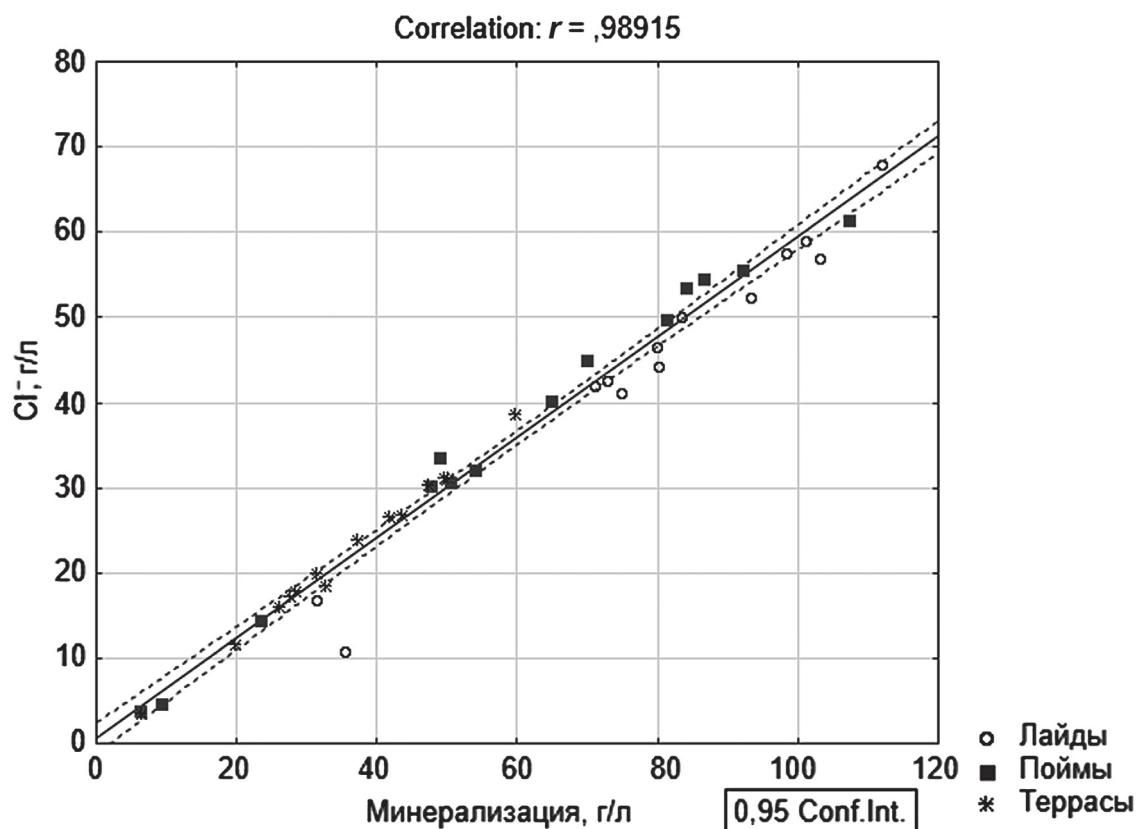


Рис. 7. Зависимость содержания иона Cl^- от минерализации криопэгов в отложениях разных геоморфологических уровней

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гиттерман К.Э. Термический анализ морской воды (концентрирование соляных растворов естественным вымораживанием) // Тр. Соляной лаборатории АН СССР. Вып. 15, ч. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1937. С. 5–24.
- Доронин Ю.П., Хасин Д.Е. Морской лед. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 318 с.
- Драйвер Дж. Геохимия природных вод. М.: Мир, 1985. 440 с.
- Жигарев Л.А. Океаническая криолитозона. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. 320 с.
- Ковда В.А. Происхождение и режим засоленных почв. М.: Изд-во АН СССР, 1946. 547 с.
- Комаров И.А. Термодинамика и тепломассообмен в дисперсных мерзлых породах. М.: Научный мир, 2003. 608 с.
- Комаров И.А., Волков Н.Г. Методика прогноза температурного и водно-ионного состав засоленных пород и криопэгов // Проблемы строительства на засоленных грунтах. М., 2007. С. 147–183.
- 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.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. М.: Наука, 2004. 678 с.
- Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010. 351 с.
- Савельев Б.А. Физика химии и строение природных льдов и мерзлых пород. М. Изд-во. Моск. ун-та, 1971. 507 с.
- Толстухин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. М.; Л.: Госгеолиздат, 1941.
- Трофимов В.Т. Закономерности пространственной изменчивости инженерно-геологических условий Западно-Сибирской плиты. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 280 с.
- Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. 3, № 2. С. 40–65.
- Хорн Р. Морская химия. М.: Мир, 1972. 398 с.
- Цуриков В.Л. Жидкая фаза в морских льдах. М.: Наука, 1976. 210 с.
- Nelson K.H., Thompson T.G. Deposition of salts from sea water by frigid concentration // J. Maron. Res. 1954. Vol. 13, № 2. P. 166–182.
- Streltskaya I.D., Kritsuk L.N. Lenses of mineralized confined groundwater (cryopegs) in the coastal area of west Yamal peninsula, Russia. Arctic Coastal Dynamics. Ber. Polarforsch. Meeresforsch. 2004. 482 p.

Поступила в редакцию 09.04.2019

Поступила с доработки 25.04.2019

Принята к публикации 25.04.2019