

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345.435.536

**ЗАЛЕЖИ ПЛАСТОВОГО ЛЬДА В РАЙОНЕ ПОЛЯРНОЙ СТАНЦИИ МАРРЕ-САЛЕ
(ЗАПАДНОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ)**

С.М. Фотиев

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; kriozem@gmail.com

При изучении сведений о пластовых льдах в обнажениях на мысе Марре-Сале основное внимание уделено анализу ионно-солевого состава и минерализации льда нижней залежи, залегающей в толще мерзлых засоленных морских отложений, и верхней залежи, залегающей в толще мерзлых незасоленных континентальных отложений. В результате сопоставления минерализации и химического состава пластовых льдов и природных вод установлены идентичность ионно-солевого состава пластовых льдов нижней и верхней залежей и гидрохимическое родство пластовых льдов и озерных вод. Доказано, что: 1) пластовые льды нижней и верхней залежей “питались” озерными водами; 2) морские воды не участвовали в формировании нижней залежи пластовых льдов; 3) формирование нижней залежи льда начиналось и происходило уже в многолетнемерзлых породах, намного позже полной регрессии моря.

Залежи пластового льда, химический состав природных вод, “материнская” вода, сформировавшая пласты льда

**MASSIVE ICE BEDS, MARRE-SALE CAPE
(WESTERN COAST OF THE YAMAL PENINSULA)**

S.M. Fotiev

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; kriozem@gmail.com

In the process of examination of information about massive ices in the outcrops of Marre-Sale Cape the main attention have been paid to the analyses of the ion-salt composition and the mineralization of the ices of the lowest massive ice bed in the stratum of the frozen salted marine deposits and of the top massive ice bed in the stratum of the frozen desalted continental deposits. The identity of the ion-salt composition of the massive ices in the top and lowest massive ice beds as well as the hydrochemical similarity of the massive ices and lake waters have been ascertained in the result of comparison of the mineralization and the chemical composition of the massive ices and natural waters. It has been substantiated that: 1) the massive ices of the top and lowest massive ice beds were supplied by the lake waters; 2) the sea waters did not take part in the formation of the lowest massive ice bed occurring in the frozen salt sea deposits; 3) the formation of the lowest massive ice bed began and took place in the permafrost much later than the flood sea regression.

Massive ice bed, chemical composition of natural waters, “parent” water, formed the massive ices

ВВЕДЕНИЕ

На западном побережье полуострова Ямал в береговых обрывах мыса Марре-Сале высотой до 30 м на протяжении более 5 км обнажаются многочисленные клиновидные льды и отдельные фрагменты залежей пластовых льдов, часто залегающих в два яруса. Пластовые льды изучаются уже более 40 лет. К настоящему времени предложено несколько гипотез формирования пластовых льдов и рассмотрены возможные источники “материнской” воды, сформировавшей пластовые льды. Однако к единому мнению ученые так и не пришли. Использо-

вая фактический материал, полученный за последние годы [Каневский и др., 2005; Стрелецкая и др., 2005; Крицук, 2010; Слагода и др., 2012], автор поставил перед собой следующие задачи: 1) исследовать условия залегания и характерные черты нижней и верхней залежей пластовых льдов; 2) изучить ионно-солевой состав и минерализацию пластовых льдов и природных вод для выявления источника “материнской” воды, сформировавшей разновозрастные пласты льда; 3) определить генезис разновозрастных залежей пластовых льдов.

ЗАЛЕЖИ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

Общее представление о существенной неоднородности геологического строения толщи многолетнемерзлых отложений, слагающих мыс Марре-Сале, и об условиях залегания в них пластовых льдов дают профили, составленные вдоль береговых обнажений (обн.) [Каневский и др., 2005; Слагода и др., 2012]. На профилях достаточно четко выделяются морские засоленные отложения и континентальные незасоленные отложения. Условия залегания пластов льда показаны на рис. 1.

Нижняя залежь пластового льда (НЗПЛ) приурочена к пачке морских и прибрежно-морских отложений, слагающих нижнюю часть береговых обнажений [Каневский и др., 2005; Крицук, 2010; Слагода и др., 2012]. В составе отложений преобладают засоленные (до 0,9 %) глины и суглинки. Видимая мощность пачки глин изменяется от 0 до 25 м. Местами горизонтальная поверхность кровли пачки глин расчленена многочисленными и глубокими эрозионными врезами. Обнажения морских глин с фрагментами пластового льда с перерывами прослежены на всем протяжении мыса Марре-Сале.

Нижняя залежь представляет собой тонкий (около 2–5 м)¹, но достаточно выдержанный по простирацию пласт льда. Примерно одинаковая толщина льда в разобренных обнажениях создает впечатление единого пласта (см. рис. 1). Видимая протяженность его отдельных фрагментов обычно не превышает 10–15 м. На некоторых участках

(обн. 1-09, 2-08, 7-08 и др.) она достигает 90–300 м. Пласт льда залегает субгоризонтально (обн. 1-09, 2-09, 7-08 и др.), но иногда смят в крутые антиклинальные складки. Контакт кровли пласта с пачкой глин – резкий (четкий).

Лед нижней залежи слоистый. Толщина горизонтальных (реже линзовидных) слоев изменяется от долей миллиметра до 10–15 см. Слои льда отличаются по цвету (от прозрачного до черного), количеству минеральных включений (вплоть до слоев заиленного песка или ледогрунта), наличию агрегатов засоленного суглинка, а также по количеству пузырьков воздуха (видимо, наиболее обильных на участках поступления воды к подошве пласта). Наличие пузырьков воздуха явно указывает на поступление воды под давлением. Слоистость в пласте льда параллельна слоистости в пачке глин, перекрывающей залежь, даже в тех случаях, когда они деформированы².

Химический состав и минерализация льдов различаются, иногда существенно (табл. 1_{I-VII}, 2₁₋₂; рис. 2)³. В анионном составе льда преобладает либо ион HCO_3^- (54–71 %-экв.), либо ион Cl^- (55–87 %-экв.), а ион SO_4^{2-} либо отсутствует, либо достигает 13 %-экв. Среди катионов преобладают ионы $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (38–95 %). Различен и солевой состав льда. В одних слоях преобладают хлориды (55–84 %) и отсутствуют морские соли, в других, наоборот, преобладают морские соли (26–66 %) и отсутствуют хлориды. Такой разнородный ионно-солевой состав льда говорит о различии химического состава “материнской” воды, подпитывающей

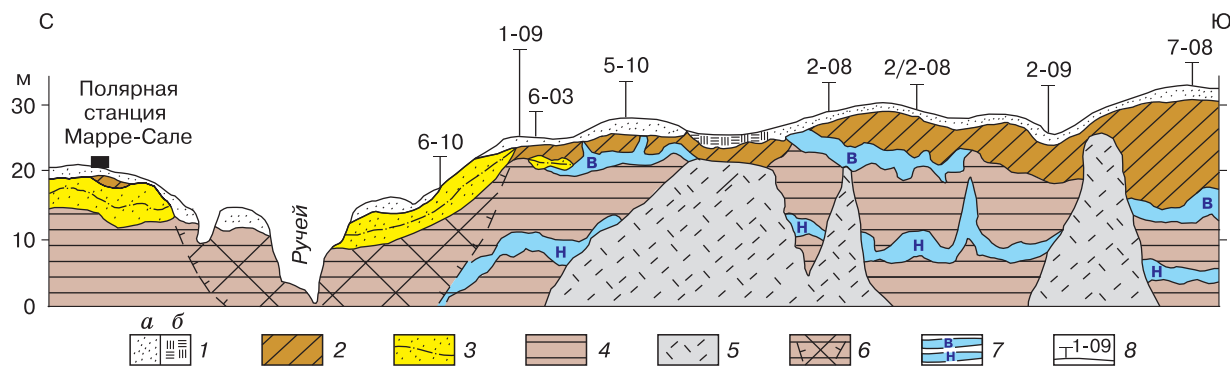


Рис. 1. Условия залегания пластовых льдов в многолетнемерзлых отложениях на берегу Карского моря (мыс Марре-Сале).

1 – покровный горизонт: а – песок, б – торф (IV²); 2 – озерно-аллювиальная супесь (lim-all III³–IV¹); 3 – аллювиально-морской песок (all,m III²⁻³); 4 – морская глина с прослоями песка (m III¹); 5 – осипы (IV); 6 – граница оттаивающих и вновь промерзших отложений; 7 – залежи пластового льда (Н – нижняя, В – верхняя); 8 – местоположение, номер и год расчистки (2003–2010). Схематизировано С.М. Фотиевым по данным Е.А. Слагоды и др. [2012].

Годы изучения: 1-й – 2003–2004 гг. [Каневский и др., 2005]; 2-й – 2007–2010 гг. [Слагода и др., 2012].

¹ Тонкий – по сравнению с пластами льда в долине р. Сеяха (Бованенковское газоконденсатное месторождение), мощность которых достигает 50 м [Крицук, 2010; Фотиев, 2012].

² Это свидетельствует о том, что деформация мерзлой толщи, вмещающей пласт льда, произошла после формирования пласта льда.

³ Рисунки 2 и 3 построены с использованием диаграммы С.А. Дурова [1961].

Таблица 1. Химический состав и минерализация пластовых льдов в районе п/с Марре-Сале

Номер пробы	Место отбора пробы	Источник сведений	Глубина от поверхности (-) или абс. высота (+), м	Минерализация, мг/л	Ионный состав, %-экв.				Солевой состав, %						
					Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Морские соли	Бикарбонаты	Сульфаты	Хлориды	
<i>Нижняя залежь пластового льда</i>															
I	МС-6/3	[Стрелецкая и др., 2005]	+5,4	67	34	28	38	45	-	55	-	-	45	-	55
II	МС-6/10	Там же	+4,5	39	26	29	45	60	-	40	-	-	60	-	40
III	МС-6/8	»	+3,0	54	37	34	29	54	-	46	-	-	54	-	46
IV	МС-3-09	[Слагодя и др., 2012]	-13,0	201	1	4	95	43	13	44	49	42	9	-	-
V	MS-7-11	[Каневский и др., 2005]	+6,8	219	4	1	95	33	7	60	66	33	1	-	-
VI	MS-7-11	Там же	+7,0	98	8	6	86	71	5	24	26	71	3	-	-
VII	МС-1-09	[Слагодя и др., 2012]	-15,7	355	14	8	78	12	1	87	4	12	-	-	84
<i>Верхняя залежь пластового льда</i>															
VIII	МС 1/31-08	Там же	+13,0	82	25	35	40	64	15	21	24	63	13	-	-
IX	МС-2/2-08	»	+25,6	53	22	26	52	62	7	31	34	62	4	-	-
X	МС-2/2-08	»	+25,6	81	15	19	66	47	7	46	51	47	2	-	-
XI	МС-2/2-08	»	+21,0	133	13	14	73	78	4	18	19	78	3	-	-
XII	MS-1-11	[Каневский и др., 2005]	-5,5	99	10	5	85	42	4	54	38	42	-	20	-
XIII	Скв. 43-86	[Крицук, 2010]	-7,5-7,6	70	-	21	79	50	8	42	46	50	4	-	-
XIV	Скв. 43-86	Там же	-8,5-8,6	264	29	35	36	65	9	26	29	65	6	-	-
XV	Скв. 43-86	»	-12,6-12,7	282	12	13	75	37	2	61	15	37	-	48	-
XVI	Скв. 43-86	»	-13,6-13,7	100	51	12	37	33	9	58	64	33	3	-	-
XVII	Устье лога	»	0,2 от кровли	40	-	42	58	62	-	38	-	62	-	38	-
XVIII	Устье лога	»	1,0 от кровли	100	14	7	79	34	3	63	33	33	-	34	-
XIX	МС-2/2-08	[Слагодя и др., 2012]	+22,0	391	1	3	96	28	-	72	-	28	-	72	-
XX	Скв. 43-86	[Крицук, 2010]	-10,5-10,6	1200	27	38	35	4	3	93	32	4	-	64	-

Примечание. Солевой состав рассчитан С.М. Фотиевым.

Таблица 2. Минерализация и солевой состав льда в смежных слоях одного пласта

№ п/п	Глубина от поверхности, м	Минерализация, мг/л	Солевой состав, %			
			Морские соли	Бикарбонаты	Сульфаты	Хлориды
<i>Нижняя залежь пластового льда (обн. 7-11) [Каневский и др., 2005]</i>						
1	6,8	219	66	33	1	–
2	7,0	98	26	71	3	–
<i>Верхняя залежь пластового льда (скв. 43-85) [Крицук, 2010]</i>						
3	7,5–7,6	70	46	50	4	–
4	8,5–8,6	264	29	65	6	–
5	10,5–10,6	1200	32	4	–	64
6	12,6–12,7	282	15	37	–	48
7	13,6–13,7	100	64	33	3	–

Примечание. Солевой состав рассчитан С.М. Фотиевым.

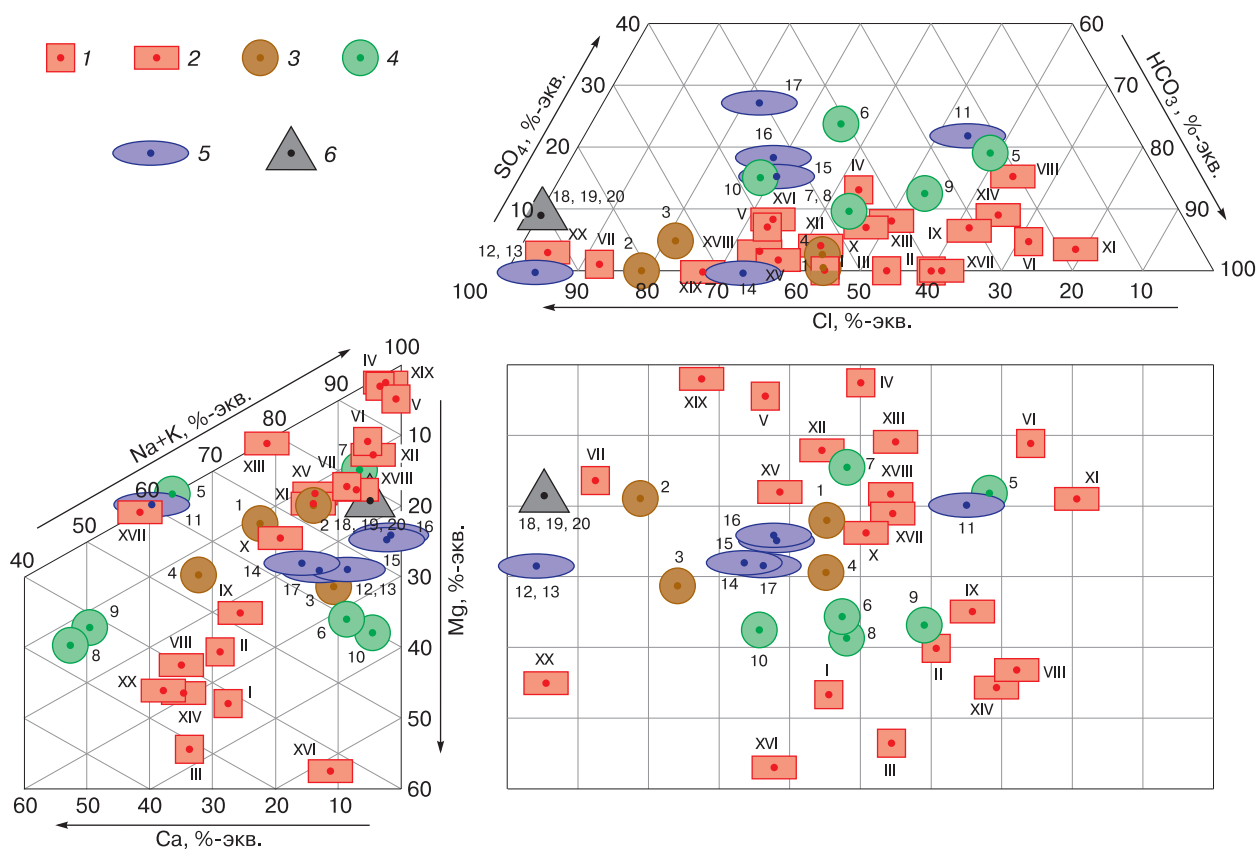


Рис. 2. Химический состав пластовых льдов на фоне химического состава снеговых, дождевых, озерных и морских вод в районе п/с Марре-Сале.

1, 2 – пластовые льды: 1 – нижней залежи, 2 – верхней залежи (I–XX – порядковый номер пробы в табл. 1); 3–6 – природные воды: 3 – снеговые, 4 – дождевые, 5 – озерные, 6 – морские (1–20 – порядковый номер пробы в табл. 4).

Таблица 3. Криогидрохимическое строение толщи морских отложений, включающей пласт льда, на берегу Карского моря в районе п/с Марре-Сале (расчетка 6-03)

№ п/п	Состав пород	Расстояние от кровли пласта, м		Минерализация, мг/л	Ионный состав, %-экв.					Соленый состав, %				
		вверх	вниз		Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Морские соли	Бикарбонаты	Сульфаты	Хлориды
1	Песок	2,5	-	4240	5	4	91	2	5	93	53	2	-	45
2	Суглинок	0,2	-	3448	5	4	91	4	3	93	32	4	-	64
<i>Поровый раствор в мерзлых породах выше кровли пласта льда</i>														
3	Лед (верхняя часть пласта)	-	0,7	67	34	28	38	45	-	55	-	45	-	55
4	Лед (центральная часть пласта)	-	1,4	39	26	29	45	60	-	40	-	60	-	40
5	Лед (нижняя часть пласта)	-	1,9	54	37	34	29	54	-	46	-	54	-	46
<i>Поровый раствор в мерзлых породах ниже подошвы пласта льда</i>														
6	Песок (0,8 м ниже подошвы пласта льда)	-	3,0	2362	2	2	96	11	18	71	79	11	10	-
7	Суглинок (1,7 м ниже подошвы пласта льда)	-	3,9	16176	4	2	94	1	1	98	11	1	-	88

Примечание. Данные И.Д. Стрелецкой [Стрелецкая и др., 2005]. Соленый состав рассчитан С.М. Фотиевым.

отдельные слои пласта. Об этом же свидетельствует степень минерализации льда, которая в разных слоях изменяется от 39 до 98 мг/л. Только в отдельных слоях минерализация льда превышает 200 мг/л (достигает 355 мг/л)⁴.

Обилие бикарбонатов (33–71 %) и незначительная минерализация (39–98 мг/л) льда свидетельствуют о “питании” НЗПЛ ультрапресными водами, состав которых формировался на суше в континентальных условиях.

Особый интерес представляют сведения о криогидрохимическом строении толщи мерзлых морских отложений, включающих пластовый лед. В 2003 г. в береговом обрыве высотой 24 м в расчетке 6-03 на глубине 20 м от поверхности И.Д. Стрелецкой и ее коллегам [2005] удалось изучить не только химический состав пластового льда, но и поровых растворов во вмещающих его песчано-глинистых отложениях.

Поровый раствор (табл. 3₁₋₂) в песчано-глинистых отложениях, перекрывающих пласт льда, имеет морской генезис. Среди ионов явно преобладают Cl⁻ (93 %-экв.) и Na⁺ + K⁺ (91 %-экв.), тогда как концентрация ионов SO₄²⁻, Mg²⁺ и Ca²⁺ невелика и примерно одинакова (3–5 %-экв.). В солевом составе суглинков преобладают хлориды (64 %), в песке – морские соли (53 %). Высокая концентрация хлоридов (45–64 %) и отсутствие сульфатов свидетельствуют о существенном криогенном преобразовании морской воды при промерзании отложений, а незначительная (менее 5000 мг/л) минерализация – о сильном опреснении криометаморфизованной морской воды⁵.

Пласт льда (см. табл. 3₃₋₅). Пласт слоистого льда мощностью 1,0–2,5 м залегает в линзе песка в пачке глин. Лед ультрапресный, но химический состав его неоднородный. Вблизи кровли и подошвы пласта отчетливо прослеживается увеличение минерализации льда и обогащение химического состава ионами Cl⁻, Na⁺ и K⁺. Это результат взаимодействия внедрившейся ультрапресной воды с засоленными морскими отложениями. Только в центральной части пласта (см. табл. 3₅) гидрокарбонатный состав и низкая (всего 39 мг/л) минерализация льда, видимо, соответствуют составу “материнской” воды. В солевом составе льда преобладают бикарбонаты (60 %), доля хлоридов 40 %, а морские соли отсутствуют. Высокая концентрация иона Mg²⁺ (26 %-экв.) и хлоридов сви-

⁴ Ранее автором было показано, что минерализация пластового льда более 200–300 мг/л встречается редко. Она характерна только для отдельных слоев льда, обогащенных засоленными минеральными включениями в виде мути или агрегатов глин [Фотиев, 1999].

⁵ Минерализация и состав порового раствора в агрегатах суглинка свидетельствуют о еще большем его опреснении (см. табл. 3₇).

детельствует о значительной криогенной метаморфизации пресной “материнской” воды.

Поровый раствор (см. табл. 3₆₋₇) в мерзлых песчано-глинистых отложениях, подстилающих пласт льда, также имеет морской генезис. Это подтверждается высокой концентрацией ионов Cl^- (71–98 %-экв.) и $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (94–96 %-экв.). Однако в результате неоднократного внедрения ультрапресных вод, сформировавших пласт льда, химический состав и минерализация поровых вод вблизи пласта существенно изменились (см. табл. 3). С приближением к подошве пласта заметно изменился анионный состав поровых вод. Если на расстоянии 170 см от пласта концентрации ионов Cl^- , SO_4^{2-} и HCO_3^- составляли 98, 1, 1 %, то на расстоянии 80 см от пласта они существенно иные и равны 71, 18 и 11 % соответственно. С приближением к подошве пласта льда также значительно изменились минерализация и солевой состав порового раствора: минерализация уменьшилась в 8 раз, концентрация бикарбонатов и сульфатов увеличилась в 10 раз, а концентрация хлоридов уменьшилась от 88 % до 0. Такая высокая (88 %) концентрация хлоридов свидетельствует о глубокой криогенной метаморфизации состава морской воды, протекавшей при низкой температуре промерзающих водовмещающих отложений [Фотиев, 1999].

Верхняя залежь пластового льда (ВЗПЛ)

приурочена к комплексу континентальных отложений, слагающих верхнюю часть береговых обрывов. В составе аллювиальных, эоловых и озерно-болотных отложений преобладают супеси, заиленные пески и значительно реже – суглинки. Мощность отложений изменяется от 3,0 до 22,5 м. Наиболее крупные фрагменты ВЗПЛ изучены в обнажениях на возвышенных участках террасы, абсолютные отметки которых близки или превышают 30 м (обн. 5-10, 2-08, 7-08; см. рис. 1). В обнажениях на пониженных участках террасы (абс. отметки ниже 20–25 м) ВЗПЛ отсутствует. Отсутствует ВЗПЛ в долинах рек и ручьев, в логах и под хасырями (обн. 6-10, 1-09, 2-09 и др., см. рис. 1) [Слагодина и др., 2012].

Верхняя залежь представляет собой достаточно тонкий (2–3 м) пласт льда, залегающий непосредственно на кровле пачки морских отложений, которая на этом участке заметно погружается в южном направлении (см. рис. 1). Видимая протяженность отдельных фрагментов пластового льда обычно не превышает 10–15 м, но на отдельных участках (обн. 5-10, 2-08, 7-08) пласт льда непрерывно прослежен на расстоянии 300–500 м [Слагодина и др., 2012].

Лед залежи слоистый. Слои и линзы прозрачного льда чередуются со слоями льда темного цвета, содержащими песок, глауконит, агрегаты глины и пузырьки воздуха. Толщина отдельных слоев льда 2–10 см [Слагодина и др., 2012].

Химический состав и минерализация льдов различаются, иногда существенно (см. табл. 1_{VIII-XX}, 2₃₋₇; рис. 2). В анионном составе льда превалирует ион HCO_3^- (47–78 %-экв.), а в отдельных слоях – ион Cl^- (54–93 %-экв.). Концентрация иона SO_4^{2-} невелика (2–15 %-экв.), но он присутствует почти во всех пробах. Среди катионов преобладают ионы Na^+ и K^+ (36–96 %-экв.), тогда как концентрация иона Ca^{2+} изменяется от 3 до 42 %-экв., а иона Mg^{2+} – от 0 до 51 %-экв. Различен и солевой состав льда. Обычно в солевом составе льда доминируют бикарбонаты (50–78 %), но в отдельных слоях концентрация морских солей достигает 64 %-экв., а хлоридов – 72 %-экв., хотя в 7 пробах из 11 хлориды полностью отсутствуют. Такой пестрый ионно-солевой состав льда свидетельствует о различии условий формирования химического состава “материнской” воды, подпитывающей отдельные слои пласта (см. табл. 1_{VIII-XX}, 2₃₋₇; рис. 2). Об этом же говорит и степень минерализации льда, которая в отдельных смежных слоях то уменьшается от 282 до 100 мг/л, то увеличивается от 70 до 264 мг/л. Только в некоторых слоях льда, содержащих обильные минеральные примеси или засоленные агрегаты суглинков, минерализация льда увеличивается до 1200 мг/л, а концентрация хлоридов повышается до 64 % (см. табл. 2).

Обилие бикарбонатов (33–78 %) и незначительная минерализация (40–130 мг/л) льда свидетельствуют о “питании” ВЗПЛ ультрапресными водами, состав которых, так же как и НЗПЛ, формировался в континентальных условиях.

ИСТОЧНИК “МАТЕРИНСКОЙ” ВОДЫ, СФОРМИРОВАВШЕЙ ЗАЛЕЖИ ПЛАСТОВОГО ЛЬДА

На протяжении многих лет вопрос об источнике “материнской” воды, сформировавшей залежи пластового льда в отложениях мыса Марре-Сале, мало интересовал исследователей, так как большинство не сомневались в том, что пласты льда сформировались за счет морской воды⁶. Именно поэтому количество проб, отобранных непосредственно из пластов льда, ограничено (табл. 1). Выявление источника “материнской” воды, сформировавшей разновозрастные залежи пластовых льдов в районе мыса Марре-Сале, представляет особый научный интерес, так как НЗПЛ

⁶ Различные точки зрения на генезис воды, сформировавшей пластовые льды на п-ове Ямал, рассмотрены ранее [Фотиев, 2012].

Таблица 4. Химический состав и минерализация атмосферных осадков и поверхностных вод в районе п/с Марре-Сале

Номер пробы	Дата и место отбора	Минерализация, мг/л	Ионный состав, %-экв.				Солевой состав, %						
			Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Морские соли	Бикарбонаты	Сульфаты	Хлориды	
<i>Снеговые воды</i>													
1	Январь 1982 г.	20	11	23	66	45	–	55	–	45	–	–	55
2	Январь 1986 г.	50	13	14	73	19	–	81	–	19	–	–	81
3	Март 1986 г.	20	11	26	63	21	5	74	54	21	–	–	25
4	Апрель 1986 г.	150	14	32	54	44	2	54	21	44	–	–	35
<i>Дождевые воды</i>													
5	Июнь 1982 г.	30	–	37	63	59	19	22	24	59	17	–	–
6	Август 1984 г.	90	32	8	60	35	24	41	45	35	20	–	–
7	Август 1984 г.	54	11	7	82	44	10	46	51	44	5	–	–
8	Август 2003 г.	54	13	53	34	44	10	46	51	44	5	–	–
9	Сентябрь 2000 г.	75	13	50	37	53	12	35	39	53	8	–	–
10	Сентябрь 1984 г.*	100	35	5	60	28	15	57	63	28	9	–	–
<i>Озерные воды</i>													
11	1984 г., оз. Ближнее	30	–	41	59	54	22	24	26	54	20	–	–
12	1986 г., оз. Загадочное	159	26	8	66	3	–	97	–	3	–	–	97
13	1986 г., оз. № 16	86	26	8	66	3	–	97	–	3	–	–	97
14	1986 г., оз. Рыбачье	116	20	16	64	33	–	67	–	33	–	–	67
15	2008 г., оз. Сюртяв Малго (глубина 4,5 м)	130	24	2	74	30	15	55	61	30	9	–	–
16	Там же (глубина 8,5 м)	140	23	2	75	28	18	54	59	29	12	–	–
17	2008 г., оз. Малое	25	24	12	64	22	27	51	54	22	24	–	–
<i>Морские воды</i>													
18	Карское море, 100 м от берега	30 223	17	5	78	–	9	91	86	1	–	–	13
19	Карское море, 2000 м от берега	17 754	18	3	79	–	10	90	99	–	1	–	–
20	Морской лед	1800	16	3	81	–	9	91	86	1	–	–	13

Примечание. Данные Л.Н. Крицук [2010]. Солевой состав рассчитан С.М. Фотиевым.

* Данные И.Д. Стрелцкой [Стрелцкая и др., 2005].

залегают в засоленных морских отложениях, а ВЗПЛ – в незасоленных континентальных отложениях. Для выявления источника, подпитывающего пластовые льды, необходимо решить две задачи. Первая задача – найти источник, который на протяжении длительного времени мог обеспечивать регулярное поступление в толщу мерзлых отложений огромных объемов ультрапресной воды. Вторая задача гидрохимическая: найти такой источник, химический состав и минерализация воды которого соответствовали бы химическому составу и минерализации пластового льда. При этом необходимо учитывать, что «разница между химическим составом “материнской” воды на суше и льда в пласте должна быть минимальной и легко объясняться условиями криогенной метаморфизации воды при переходе из жидкой фазы в твердую» [Фотиев, 2012, с. 19].

При решении первой задачи автор опирался на рассмотренные выше основные характеристики НЗПЛ и ВЗПЛ.

1. Лед в разновозрастных пластах имеет низкую минерализацию и одинаковый ионно-солевой состав, несмотря на то что НЗПЛ сформировалась в засоленных морских отложениях, а ВЗПЛ – в незасоленных континентальных отложениях. Это указывает на идентичность источника “материнской” воды.

2. Однородный гидрокарбонатный кальциево-натриевый состав ультрапресного льда указывает на континентальный генезис “материнской” воды, сформировавшей пласты льда нижней и верхней залежей.

3. Огромный объем льда (при толщине слоя 10–15 см на значительном расстоянии) свидетельствует о крупном источнике, обеспечивающем одноразовое поступление больших объемов воды к подошве пластов.

4. Параллельность отдельных слоев льда разных толщин и цветов, с различной минерализацией и разным химическим составом указывает на периодическое, но регулярное поступление к подошве пласта то малых, то больших объемов ультрапресной воды с разным, но всегда значительным напором.

5. Четкие границы многочисленных отдельных слоев льда, различающихся по указанным выше признакам, говорят о многократных инъекциях воды. При этом каждая последующая инъекция происходила после полного замерзания слоя воды, образованного предыдущей инъекцией.

6. Четкая слоистость пласта льда свидетельствует о сезонном наращивании его толщины снизу. В зимний период (скорее всего, в конце него) происходила инъекция воды к подошве пласта, а в летний период слой воды замерзал, формируя очередную слой льда пласта⁷.

Анализ основных характеристик пластов льда однозначно показал единственный источник, который в суровых палеоклиматических и палеогеокриологических условиях района полярной станции (п/с) Марре-Сале, мог обеспечивать регулярное поступление к подошве пластов льда огромных объемов ультрапресной воды. Таким источником могли быть только многочисленные озера и подозерные талики, широко развитые в настоящее время и эпохи формирования пластов льда.

Для решения второй задачи автор изучил химический состав снеговых, дождевых, озерных и морских вод в районе п/с Марре-Сале (табл. 4).

Снеговые воды (табл. 4_{1–4}). В анионном составе преобладает ион Cl^- (54–81 %-экв.) при значительной концентрации иона HCO_3^- (19–45 %-экв.), концентрация иона SO_4^{2-} невелика (0–5 %-экв.). Среди катионов преобладают ионы $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (54–73 %-экв.); концентрация иона Ca^{2+} 14–32 %-экв., иона Mg^{2+} 11–14 %-экв.

Высокая концентрация хлоридов (до 81 %), полное отсутствие сульфатов и значительный диапазон минерализации (20–150 мг/л) – характерные особенности снеговых вод в районе п/с Марре-Сале. Они во многом определяются близостью моря и неоднородностью криогенной метаморфизации морской воды и снежного покрова при низкой температуре воздуха в зимний период.

Дождевые воды (см. табл. 4_{5–10}). В анионном составе преобладает ион Cl^- (41–57 %-экв.) и реже ион HCO_3^- (53–59 %-экв.) при высокой концентрации иона SO_4^{2-} (10–24 %-экв.). Среди катионов преобладают ионы $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (60–82 %-экв.) и реже ион Ca^{2+} (50–53 %-экв.), тогда как концентрация иона Mg^{2+} изменяется от 0 до 35 %-экв.

Обилие морских солей (24–63 %) и бикарбонатов (28–59 %), наличие во всех пробах сульфатов (5–20 %), полное отсутствие хлоридов и значительный диапазон минерализации (30–100 мг/л) – характерные особенности дождевых вод⁸.

Ионно-солевой состав снеговых и дождевых вод в районе п/с Марре-Сале (см. табл. 4) отличается от состава атмосферных осадков, рассчитан-

⁷ Возможный механизм формирования пластовых льдов в результате многократных инъекций воды из озера или подозерного талика рассмотрен в работе [Фотиев, 2011].

⁸ Систематические наблюдения автора за изменением химического состава и минерализации дождевых вод в Южной Якутии [Фотиев, 1964] показали: 1) химический состав и минерализация дождевой воды существенно изменяются как в количественном, так и в качественном отношении; 2) наиболее высокая минерализация дождевой воды характерна для начальных фракций дождя (особенно после засушливого периода), в которых концентрация ионов HCO_3^- , Ca^{2+} и $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, содержащихся в метеорной пыли, наиболее высокая; 3) минимальная минерализация дождевой воды характерна для последних фракций дождя, в которых преобладают ионы Cl^- и $\text{Na}^+ + \text{K}^+$.

Таблица 5. Средний химический состав и минерализация пластовых льдов, атмосферных осадков и поверхностных вод в районе п/с Марре-Сале и на п-ове Ямал

№ п/п	Район отбора	Кол-во проб	Минерализация, мг/л	Ионный состав, %-экв.					Солевой состав, %				
				Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Морские соли	Бикарбонаты	Сульфаты	Хлориды
1	Марре-Сале	6	113 (39–219)	18 (1–37)	17 (1–34)	65 (29–95)	50 (33–71)	5 (0–13)	45 (24–60)	24 (0–66)	51 (33–71)	2 (0–9)	23 (0–55)
2	Марре-Сале	11	109 (40–282)	17 (0–51)	21 (5–42)	62 (36–85)	52 (33–78)	6 (0–15)	42 (21–63)	32 (0–64)	52 (37–78)	3 (0–13)	13 (0–48)
3	Ямал	168	77 (1–300)	24	28	48	50	13	37	41	50	20	–
4	Марре-Сале	10	64 (20–150)	15 (0–35)	26 (5–50)	59 (34–82)	39 (19–59)	10 (0–24)	51 (54–81)	35 (0–63)	39 (19–59)	6 (0–20)	20 (0–81)
5	Ямал	43	30 (5–104)	11	23	66	48	11	41	46	48	6	–
6	Марре-Сале	4	60 (20–150)	12 (11–14)	24 (14–32)	64 (54–73)	32 (19–45)	2 (0–5)	66 (54–81)	19 (0–54)	32 (19–45)	–	49 (25–81)
7	Ямал	29	21 (5–80)	6	19	75	48	7	45	36	48	3	13
8	Марре-Сале	6	67 (30–100)	17 (11–35)	27 (5–50)	56 (34–82)	44 (28–59)	15 (10–24)	41 (22–57)	45 (24–63)	44 (28–59)	11 (5–20)	–
9	Ямал	14	49 (24–104)	19	33	48	49	19	32	36	49	15	–
10	Марре-Сале	7	98 (25–159)	20 (0–26)	12 (2–41)	68 (59–85)	25 (3–54)	12 (0–22)	63 (51–97)	29 (0–61)	25 (3–54)	9 (0–24)	37 (0–97)
11	Ямал	107	57 (18–300)	18	32	50	55	5	40	44	55	1	–

Примечание. Рассчитано С.М. Фотиевым. В скобках – пределы изменения минерализации и содержания (%) отдельных ионов и солей. Сведения о среднем химическом составе и минерализации пластовых льдов и природных вод на п-ове Ямал опубликованы в работе [Фотиев, 1999]. Для Ямала рассчитаны только пределы изменения минерализации воды или льда.

ного автором для п-ова Ямал [Фотиев, 1999]. Эти различия наиболее заметны при сравнении их средних ионно-солевых составов (табл. 5_{4,5}). На треугольниках и квадрате диаграммы С.А. Дурова [1961] отчетливо видно, что современные точки снеговых, дождевых и озерных вод района п/с Марре-Сале (рис. 3, 6, 8, 10) расположены гораздо ближе к точке морской воды по сравнению с аналогичными точками Ямала (рис. 3, 7, 9, 11). Это обусловлено более высокой концентрацией ионов Cl^- и Na^+ и более низкой концентрацией иона HCO_3^- в осадках п/с Марре-Сале и свидетельствует об активной роли моря в формировании химического состава атмосферных осадков в прибрежных районах Ямала.

Озерные воды (см. табл. 4₁₁₋₁₇). Минерализация и химический состав снеговых и дождевых вод в значительной мере определяют химический состав воды в озерах. Это подтверждается иден-

тичностью минерализации и однотипностью химического состава (см. табл. 4), а также близким размещением точек химического состава на треугольниках и квадрате диаграммы (см. рис. 2). Тем не менее химический состав озерных вод отличается от состава атмосферных осадков. Основная причина этого – криогенное преобразование химического состава в процессе сезонного замерзания озерной воды и таяния озерного льда. В анионном составе озерных вод преобладает ион Cl^- (51–97 %-экв.), а концентрация ионов HCO_3^- (3–54 %-экв.) и SO_4^{2-} (0–27 %-экв.) изменяется в широком диапазоне. В катионном составе преобладают ионы $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (59–75 %-экв.), концентрация иона Ca^{2+} изменяется от 2 до 41 %-экв., а Mg^{2+} – от 0 до 26 %-экв. Солевой состав озерной воды разнороден: в разных озерах концентрации отдельных солей изменяются в широком диапазоне: морские соли – 0–61 %, бикарбонаты – 3–54 %,

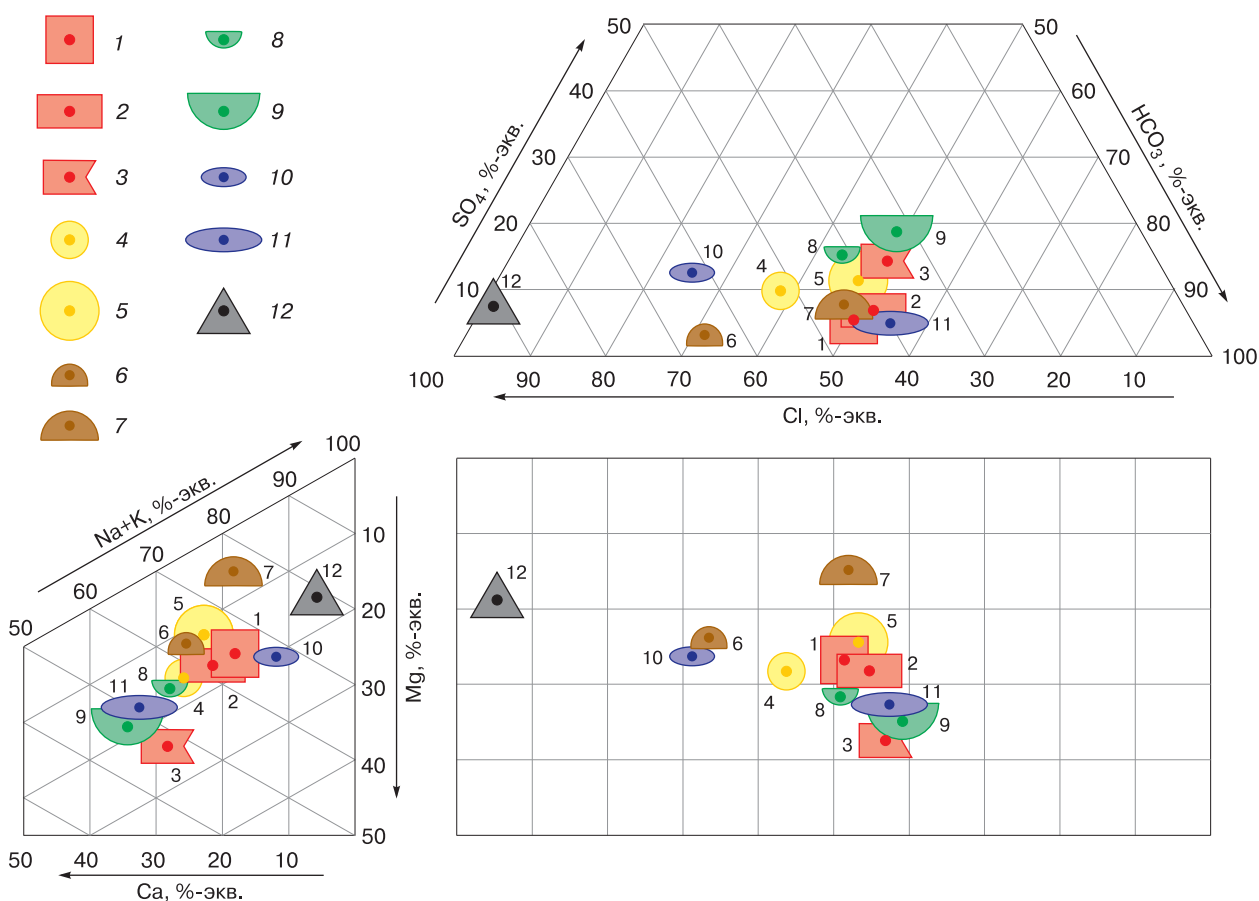


Рис. 3. Средний химический состав пластовых льдов на фоне среднего химического состава снеговых, дождевых, озерных и морских вод в районе п/с Марре-Сале (МС) и полуострова Ямал (Я) по данным табл. 5).

1–3 – пластовые льды: 1 – нижняя залежь, МС, 2 – верхняя залежь, МС, 3 – Я; 4, 5 – атмосферные осадки: 4 – МС, 5 – Я; 6, 7 – снеговые воды: 6 – МС, 7 – Я; 8, 9 – дождевые воды: 8 – МС, 9 – Я; 10, 11 – озерные воды: 10 – МС, 11 – Я; 12 – морские воды, МС.

сульфаты – 0–24 % и хлориды – 0–97 %. Минерализация озерной воды изменяется от 25 до 159 мг/л (см. табл. 4).

Морские воды (см. табл. 4_{18–20}). Ионно-солевой состав морской воды, как известно, отличается большой стабильностью. Для вод морского генезиса характерны конкретные соотношения анионов $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ и катионов $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$. Важно, что эти соотношения сохраняются даже при значительном разбавлении морских вод пресными и в химическом составе морского льда. В солевом составе морской воды Карского моря, что вполне естественно, явно преобладают морские соли (86–99 %) при незначительной концентрации хлоридов (0–13 %) и малой концентрации бикарбонатов и сульфатов (0–1 %-экв.).

ГЕНЕЗИС ЗАЛЕЖЕЙ ПЛАСТОВОГО ЛЬДА

На примере мощных (до 50 м) пластов льда, изученных на территории Бованенковского газоконденсатного месторождения, автор доказал гидрохимическое единство химических составов пластовых льдов и озерной воды. Тем самым было доказано формирование пластов льда в результате многократного внедрения озерной воды и воды подозерных таликов в толщу мерзлых морских отложений [Фотиев, 2012]. Сравнение химических составов озерных вод и пластовых льдов в районе п/с Марре-Сале также указывает на их гидрохимическое родство, а следовательно, и на озерный генезис “материнской” воды. Тем не менее большая группа исследователей, опираясь на результаты химических анализов отдельных проб льда и на морской генезис вмещающих отложений, уверены в том, что в формировании НЗПЛ морские воды принимали активное участие. По мнению М.З. Каневского с соавторами, формирование пластового льда “могло происходить при промерзании опресненного водоносного горизонта, заключенного в толще морских глин в условиях мелководья или сразу после выхода из-под уровня моря” [Каневский и др., 2005, с. 23]. И.Д. Стрелецкая с соавторами полагают: “Формирование пресных пластов льдов пластовых льдов могло происходить при промерзании насыщенных опресненной водой песков на границе раздела глина–песок в условиях мелководья или сразу после выхода из-под уровня моря, что позволило сохранить седиментационные соли в морских отложениях. Часть солей при промерзании воды из раствора отжималась в нижележащие горизонты, повышая концентрацию порового раствора песков” [Стрелецкая и др., 2005, с. 258]. Е.А. Слагода и ее соавторы считают, что НЗПЛ “по относительно повышенной минерализации и морскому составу солей, крупнокристаллической структуре льда, параллельной слоистос-

ти и положению в морской глинистой толще ... могла формироваться при эпигенетическом промерзании сверху в открытой системе по сегрегационному типу ледообразования с отжатием солей при миграции воды к фронту промерзания” [Слагода и др., 2012, с. 21].

Итак, существует две точки зрения на генезис воды, сформировавшей НЗПЛ в районе п/с Марре-Сале, – это озерный и морской. Решить эту проблему можно только на основе тщательного сравнения минерализации и ионно-солевого состава пластового льда, озерной и морской воды.

Решение этой спорной проблемы позволит однозначно ответить еще на один очень важный вопрос: когда началось формирование пласта льда – до регрессии моря или значительно позднее? Если пласт льда подпитывался морскими водами, то он сформировался до полной регрессии моря, так как для образования пласта льда мощностью 2–5 м необходимы огромные объемы морской воды. Если пласт льда подпитывался озерными водами, то он сформировался значительно позднее полной регрессии моря, так как нужен весьма продолжительный период времени для формирования на поверхности морской равнины в толще многолетнемерзлых пород крупных озер и глубоких подозерных таликов.

В поисках источника “материнской” воды автор нанес на диаграмму точки химического состава льда нижней залежи и природных вод (см. рис. 2). И на треугольниках, и на квадрате точки пластового льда, снеговых, дождевых и озерных вод буквально перемешались. Еще нагляднее гидрохимическое родство озерных вод и льда нижней залежи прослеживается при сравнении средних составов (см. табл. 5). На рис. 3 видно, насколько однородны по химическому составу озерные воды и пластовые льды нижней залежи. Это означает, что пластовый лед “питался” озерными водами и сформировался в результате многократных инъекций озерной воды к подошве пласта.

Какова же роль морской воды в формировании пластового льда нижней залежи, на ведущую роль которой так упорно ссылаются исследователи? Сравнение минерализации и химического состава морской воды (см. табл. 4) и льда нижней залежи, залегающей в морских засоленных отложениях (см. табл. 1), указывает на их существенное генетическое различие. Наиболее явно это различие видно на диаграммах – ни одна точка пластового льда нижней залежи на треугольниках и квадрате даже не приближается к точке морской воды (см. рис. 2, 3). Исключение составляют лишь единичные точки, характеризующие состав льда в изолированных слоях пласта, обогащенных засоленными минеральными включениями (см. рис. 2, VII, XIX, XX). Именно эти включения повышают

минерализацию и обогащают лед морскими ионами (Cl^- и Na^+)⁹. Однако это не основание для вывода об участии морских вод в формировании пласта льда в морских отложениях, как это до настоящего времени делают некоторые исследователи [Слагодина и др., 2012]. На рис. 2 видно, что большая часть точек химического состава пластового льда располагается на значительном расстоянии от точки морской воды. Этот факт не только указывает на генетическое различие морской и “материнской” воды, сформировавшей пласт льда, но и свидетельствует о том, что морская вода не участвовала в формировании пласта льда нижней залежи.

Для выяснения генезиса воды, сформировавшей ВЗПЛ, автор нанес сведения о химическом составе пластового льда из табл. 1 на диаграмму рис. 2. На ней отчетливо видна однородность химического состава в разновозрастных пластах льда. В треугольниках и квадрате точки химического состава льда нижней и верхней залежей буквально перемешаны. Они располагаются в непосредственной близости от точек химического состава озерной воды, но на значительном расстоянии от точки морской воды. Такое размещение точек не случайно. Оно свидетельствует об идентичности источника “материнской” воды, сформировавшей пласт льда нижней залежи в засоленных морских отложениях и пласт льда верхней залежи в незасоленных континентальных отложениях. Таким источником “материнской” воды, судя по химическому составу и минерализации льда, могут быть только озерные воды.

Пласт льда верхней залежи, так же как и пласт льда нижней залежи, “питался” озерными водами и сформировался в результате многократных инъекций озерной воды к подошве пласта.

Однако точки среднего химического состава пластовых льдов нижней и верхней залежей (см. рис. 3, 1, 2) и на треугольниках, и на квадрате расположены вдали от точек современных снеговых и озерных вод (см. рис. 3, 6, 10). Гораздо ближе к ним находятся точки снеговых и озерных вод Ямала (см. рис. 3, 7, 11). Этот факт позволяет утверждать, что в эпохи формирования НЗПЛ и ВЗПЛ современная территория района п/с Марре-Сале располагалась вдали от береговой линии моря.

ВЫВОДЫ

Анализ основных характеристик пластовых льдов нижней и верхней залежей и сопоставление минерализации и химического состава пластовых льдов и природных вод в районе полярной стан-

ции Марре-Сале позволили сделать следующие выводы.

- Доказана однородность минерализации и химического состава пластового льда нижней залежи, сформировавшегося в засоленных морских отложениях, и пластового льда верхней залежи, сформировавшегося в незасоленных континентальных отложениях, что указывает на идентичный источник “материнской” воды.

- Доказана однородность химического состава озерных вод и пластового льда нижней и верхней залежей, что указывает на “питание” пластовых льдов озерными водами. О многократных инъекциях озерной воды к подошве свидетельствует четко выраженная слоистость пласта.

- Показано, что источниками, обеспечивающими регулярное одноразовое поступление к подошве пласта огромных объемов ультрапресной воды в суровых палеоклиматических и палеогео-криологических условиях эпох формирования пластовых льдов нижней и верхней залежей, могли быть только многочисленные озера и подозерные талики.

- Установлено, что криогидрохимическое строение толщи мерзлых морских отложений, включающих пласт льда, подтверждает не только сам факт внедрения ультрапресной воды, но и существенное опреснение поровых растворов вблизи пласта льда.

- Небольшая (около 2–5 м) толщина пластов указывает на относительно короткий период “водоснабжения” ледяных пластов нижней и верхней залежей озерными водами.

- Доказано генетическое различие химического состава морской воды и пластового льда нижней залежи и показано, что формирование нижней залежи пластового льда происходило после полной регрессии моря, после многолетнего промерзания отложений морской равнины и формирования на ней крупных термокарстовых озер и подозерных таликов. Именно поэтому морская вода не могла участвовать в формировании пластового льда нижней залежи, как считают многие исследователи до настоящего времени.

Литература

Дуров С.А. Синтез в гидрохимии. Происхождение солевого состава природных вод / С.А. Дуров. Ростов н/Д., Кн. изд-во, 1961, 248 с.

Каневский М.З., Стрелецкая И.Д., Васильев А.А. Закономерности формирования криогенного строения четвертичных отложений Западного Ямала (на примере района Марре-Сале) // Криосфера Земли, 2005, т. IX, № 3, с. 16–27.

⁹ Ранее автором было показано, что эти слои формируются водой, поступающей к подошве пласта из промерзающего подозерного талика, и лишь в том случае, когда озерная вода полностью промерзла [Фотиев, 2011].

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 352 с.

Слагода Е.А., Опокина О.Л., Рогов В.В., Курчатова А.Н. Строение и генезис подземных льдов в верхнеплейстоцен-голоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 9–22.

Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А., Сурков А.В. Особенности состава пластовых льдов и вмещающих их четвертичных отложений в районе Марре-Сале (Западный Ямал) // Материалы Третьей конф. геокриологов России (Москва, 1–3 июня 2005 г.). М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 3, с. 251–259.

Фотиев С.М. Химический состав атмосферных осадков в районе пос. Чульман Якутской АССР // Гидрохимические материалы. Л., Гидрометеиздат, 1964, т. XXXVI, с. 1–14.

Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 40–65.

Фотиев С.М. Механизм формирования инъекционных жил льда и гидролакколитов // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 2, с. 41–55.

Фотиев С.М. Химический состав и генезис воды, сформировавшей повторно-инъекционные пластовые льды на площади Бованенковского месторождения // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 3, с. 3–28.

*Поступила в редакцию
10 сентября 2013 г.*