

КРИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ, КРИОПЭГОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА¹

И. Д. Стрелецкая, М. О. Лейбман*

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, геогр. ф-т, 119899, Москва, Воробьевы горы, Россия

*Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

Имеющийся фактический материал рассмотрен с позиций формирования криопэгов как остаточных рассолов при образовании пластовых залежей льда. Приводятся типы характерных для Центрального Ямала схематических геологических разрезов, включающие пластовые льды и криопэги. Химический состав криопэгов, льда и вмещающих пород, а также их положение в разрезе, предполагают генетическую взаимосвязь между этими объектами. Предлагается криогеохимическая модель системы: мерзлые породы—пластовые льды—криопэги. Формирование системы представляется как процесс промерзания вышедших на поверхность или на мелководье глин, подстилаемых водноносным песком, и образование пластового льда на границе раздела глина—песок, с отжатием в последний остаточных рассолов-криопэгов.

Пластовые льды, криопэги, криогеохимическая модель

CRYOGEOCHEMICAL INTERRELATION OF MASSIVE GROUND ICE, CRYOPEGGS, AND ENCLOSING DEPOSITS OF CENTRAL YAMAL

I. D. Streletskaia, M. O. Leibman*

Moscow State University, Department of Geography, 119899, Moscow, Vorobjovy Gory, Russia

** Earth Cryosphere Institute SB RAS, 625000, Tyumen, 1230, Russia*

Field data obtained by now are discussed from the point of view of cryopegs as of residual solutions resulting from massive ground ice formation. Several patterns are given for geological sections enclosing massive ground ice and cryopegs characteristic for Central Yamal. Chemical composition of cryopegs, ice, and enclosing deposits, as well as their position in the section allow conclusion on the genetic relationship of these objects. A cryogegeochemical model of the system frozen deposits—massive ground ice—cryopegs is suggested. Formation of such a system is suggested to result from freezing of exposed or shallow water clayey deposits, underlain by sandy aquifer and formation of massive ground ice at the clay/sand interface, with squeezing of brine-cryopegs into the sand.

Massive ground ice, cryopegs, cryogegeochemical model

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время повысился интерес к изучению пластовых льдов. Предлагаются различные модели формирования ледяных тел как внутргрунтовых (а не захороненных) образований, базирующиеся на изучении конкретных природных объектов [Данилов, 1989; Попов, 1991; Штолянская, 1993; 1999] и на основе численного математического моделирования [Данилов и др., 1999; Гречишев и др., 2000]. В том числе появляются данные о современном формировании пластового льда под дном моря [Мельников и др., 1998] и на морском мелководье [Великоцкий, 2001].

В литературе встречаются упоминания как о криогидротектонической [Крицук, 2001], так и о геохимической [Анисимова, Крицук, 1983], в том числе изотопной [Тарасов, 1990], взаимосвязи пластовых льдов и подземных вод. Изучается химический состав подземных льдов и вме-

щающих их пород [Крицук, Поляков, 1988; Инженерно-геологический мониторинг..., 1996; Фотиев, 1999; Коняхин и др., 2001] и на основании этого делаются заключения о генезисе льдов.

Авторы статьи в течение ряда лет развивают геохимический подход к исследованию пластовых льдов с целью создания „криогеохимической модели“ формирования пластового льда Центрального Ямала [Стрелецкая, 1991а, б; Лейбман, Стрелецкая, 1996; Стрелецкая, Лейбман, 2001; Leibman, 1996]. Выбор района исследования не случаен и связан с большим количеством опубликованных результатов исследования пластовых льдов как в естественных обнажениях, так и в большом количестве скважин, в которых встречаются пластовые залежи льда на различных глубинах. Центральный Ямал — это район широкого распространения морских засо-

¹ Редколлегия журнала приняла решение о публикации данной статьи, руководствуясь ее содержательной частью, хотя не разделяет позиции авторов по вопросу о „формировании криопэгов, как остаточных рассолов при образовании пластовых залежей льда“.

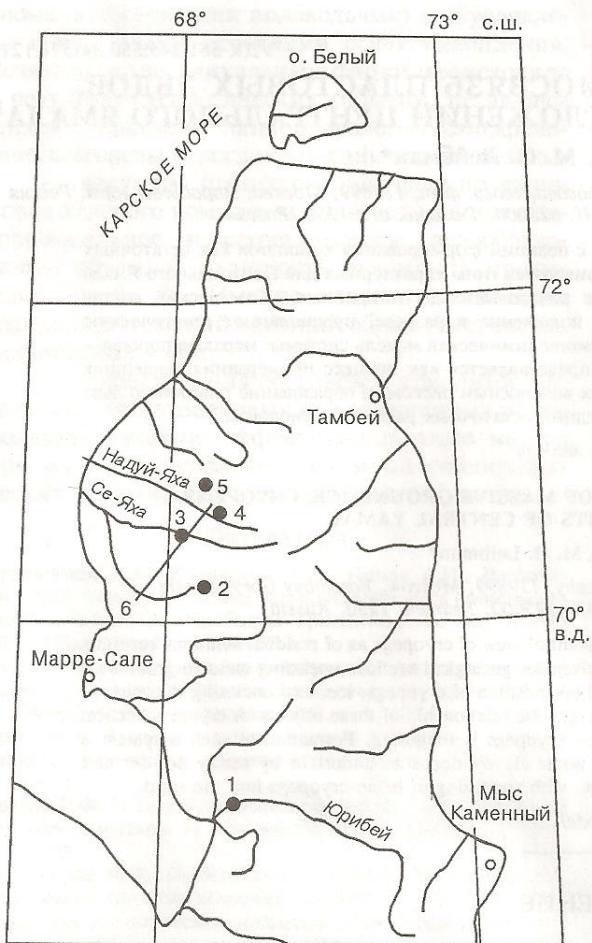


Рис. 1. Схема расположения геологических разрезов:

1 — через долину р. Юрибей; 2 — через долину р. Нерома-Яха; 3 — через долину р. Се-Яха (Мутная); 4 — через долину р. Надуй-Яха; 5 — в районе оз. Войнунг-То; 6 — схематический разрез четвертичных отложений (см. рис. 2).

ленных отложений и криопэгов, что позволяет оперировать при сравнении результатов геохимических анализов наличием существенных концентраций ионов в пластовом и шлировом льдах.

Анализ опубликованных и фондовых геологических материалов свидетельствует о существовании в разрезе линз минерализованных напорных вод (криопэгов) под пластовыми льдами. Такие разрезы встречены в долинах рек Се-Яха (Мутная) [Инженерно-геологический мониторинг..., 1996], Нерома-Яха и Нгэрм-Лымбадъяха [Лейбман и др., 1991], в районе оз. Войнуг-То [Тарасов, 1990] (рис. 1, точки 2, 3, 4 соответственно).

Химический состав пластовых льдов, залегающих в морских отложениях Ямала, впервые исследовали Г. И. Дубиков и М. М. Корейша

[1964]. Они отмечали, что химический состав льда неоднороден, а минерализация расплава льда колеблется от 10 до 250 мг/л и возрастает от центральных частей залежи к периферии, содержащей больше грунтовых примесей. По ионному составу пластовые льды пресные и ультрапресные, с гидрокарбонатным, гидрокарбонатно-хлоридным, гидрокарбонатно-сульфатным натриевым, хлоридным, сульфатным натриевым составом. В пределах одного пласта минерализация расплава льда и его химический состав существенно меняются по разрезу [Анисимова, Крицук, 1983; Геокриология..., 1989; Фотиев, 1999], а минерализация льда, содержание Cl^- и отношение $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ возрастают от чистого льда к ледогрунту по мере увеличения количества минеральных включений. При этом расплав из чистого льда имеет, как правило, гидрокарбонатный кальциевый состав, а химический состав расплава из ледогрунта — хлоридно-натриевый. По мнению М. М. Корейши и др. [1983], „превладание бикарбонат-иона в составе воды из льда пластовых залежей не является свидетельством континентального происхождения этих масс воды, а скорее генетическим преобразованием исходных морских вод, первичный качественный состав которых изменен еще не полностью“ [с. 84].

Существование криогеохимической взаимосвязи текстурообразующих и пластовых льдов с поровыми растворами, заключенными в глинах, было обосновано Г. И. Дубиковым [Дубиков, 1982, 1983]. Геохимические исследования перекрывающих пластовые льды глинистых пород проводились Г. И. Дубиковым в районе оз. Ней-То с целью оценки условий их образования и установления связи с пластовыми льдами. Г. И. Дубиков пришел к заключению, что засоленность глинистых отложений в районе оз. Ней-То связана с существованием здесь морского бассейна, более пресного, по сравнению с современными морями. Предполагалось отложение пород в морской опресненной лагуне и формирование пластового льда „за счет свободной воды, содержащейся на ранних стадиях диагенеза в промерзших осадках“ [Дубиков, 1983, с. 72].

Формирование пластовых залежей в ледово-морских отложениях тонкодисперсного состава предполагал И. Д. Данилов [1989], подчеркивая, что во всех случаях общим, объединяющим признаком залежей и вмещающих пород является их тесная взаимосвязь, они составляют друг с другом как бы единое целое. По его мнению, возникновение ледяной залежи связано с „...внедрением пресных вод подземного стока в отрицательно температурные неуплотненные донные илы, частичным смешением с иловыми водами, распреснением последних и замерзанием

КРИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

при данных температурах" [Данилов, 1989, с. 21].

С. М. Фотиев [1999] на основании анализа многочисленных данных по ионно-солевому составу природных вод Ямала делает вывод, что ведущую генетическую роль в формировании ультрапресных льдов гидрокарбонатного класса играют атмосферные осадки и поверхностные воды, в формировании льдов с минерализацией выше 200—1000 мг/л хлоридного класса — морские воды.

Существование подо льдом водоносного горизонта, а надо льдом глинистого водоупора, а также случаи совмещения в разрезе пластовых льдов и криопэгов, приводят к мысли о генетической связи компонентов разреза (пластового льда, криопэгов и вмещающих их песков и глин). Такая связь должна отразиться в химическом составе компонентов разреза. Существование взаимосвязи предполагалось (и подтверждалось изотопными и химическими данными) А. М. Тарасовым [1990] для района р. Се-Яха (Мутная), И. Д. Стрелецкой [1991а, б] для района рек Надуй-Яха и Се-Яха (Мутная).

На основе анализа данных о положении в разрезе засоленных пород, пластов льда, линз криопэгов и их геохимическом составе авторы предлагают криогеохимическую модель формирования пластового льда сегрегационного или смешанного (инъекционно-сегрегационного) типов.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

На п-ове Ямал все основные стратиграфические горизонты мерзлых отложений четвертичного возраста засолены с поверхности севернее 68° с.ш., т. е. севернее границы протаивания мерзлых пород с поверхности в оптимум голоцен. Из разрезов глубоких скважин следует, что в морском бассейне непрерывно происходило осадконакопление на протяжении плейстоцена. Породы, вмещающие пластовые льды, имеют первичную седиментационную засоленность, о чем свидетельствует морской тип засоления и характер распределения легкорастворимых солей в разрезе [Дубиков, Иванова, 1990; Соломатин, Коняхин, 1997].

В отложениях Центрального Ямала неоднократно отмечалось существование линз криопэгов под пластовыми льдами и слоев льда повышенной минерализации [Трофимов и др., 1980; Дубиков, 1983; Тарасов, 1990; Лейбман и др., 1991; Стрелецкая, 1991а, б; Инженерно-геологический мониторинг..., 1996].

Линзы с криопэгами на п-ове Ямал встречаются в толще морских засоленных мерзлых и охлажденных пород на глубинах от 5 до 215 м [Стрелецкая, 1991а; Streletskaia, 1994, 1998]. К настоящему времени существует несколько мне-

ний относительно области распространения линз криопэгов на Ямале. В. Т. Трофимов с соавторами [Полуостров..., 1975] связывают широкое распространение линз криопэгов с 20 км полосой, вытянутой вдоль западного побережья п-ова Ямал. Ф. Э. Арэ с соавторами, анализируя материалы бурения Ленгипротранса, устанавливает область широкого распространения линз криопэгов в днищах речных долин бассейна Карского моря [Арэ и др., 1990]. О. П. Павлова [1991] объясняет подобную приуроченность тем, что большинство скважин глубиной 30—50 м было заложено в местах мостовых переходов через долины рек. Здесь линзы криопэгов встречены и в скважинах, тогда как на водоразделах с абс. отм. около 40 м скважины глубиной 10—15 м не достигают зоны распространения линз криопэгов (расположенной, как правило, на абс. выс. ниже 0 м). Существование линз криопэгов в разрезах речных долин связывается О. П. Павловой и Н. В. Ивановой [1992] с голоценовой морской ингрессией, граница которой в пределах пойм рек Западного Ямала проводится по абс. отм. 10 м. Однако этим можно объяснить лишь существование неглубоко залегающих линз, формирование и сохранение которых связано с локальным понижением средней годовой температуры засоленных пород при промерзании подрусловых и подозерных таликов, а также при локальном повышении температуры засоленных пород (но не выше 0 °C), когда в породе увеличивается содержание свободной воды. Линзы криопэгов, залегающие глубже 10 м, приурочены к песчаной пачке морских отложений, слагающей цоколь пойм и подстилающих пластовые льды в пределах высоких уровней. Водоносные песчаные коллекторы в поймах рек закартированы экспедицией ТИГМИ в 1987 г. при поиске пресных вод в районе рек Се-Яха (Мутная) и Морды-Яха. Линзы криопэгов, мощностью от нескольких сантиметров до нескольких метров и протяженностью от 1 до 200—500 м, встречены на глубинах 25—36 м (на абс. отм. от 0 до -40 м, рис. 2). Минерализация криопэгов при хлоридно-натриевом химическом составе меняется от 20 000 до 80 000 мг/л, что свидетельствует о различной степени криогенной метаморфизацией исходной воды.

ПОДХОД К КРИОГЕОХИМИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТОВОГО ЛЬДА

Криолитологические типы разрезов

Располагая большим количеством разрезов по скважинам и описаний естественных обнажений в районе Бованенковского месторождения (Центральный Ямал) [Пармузин, Суходольский, 1982; Тарасов, 1990; Стрелецкая, 1991а, б; Ин-

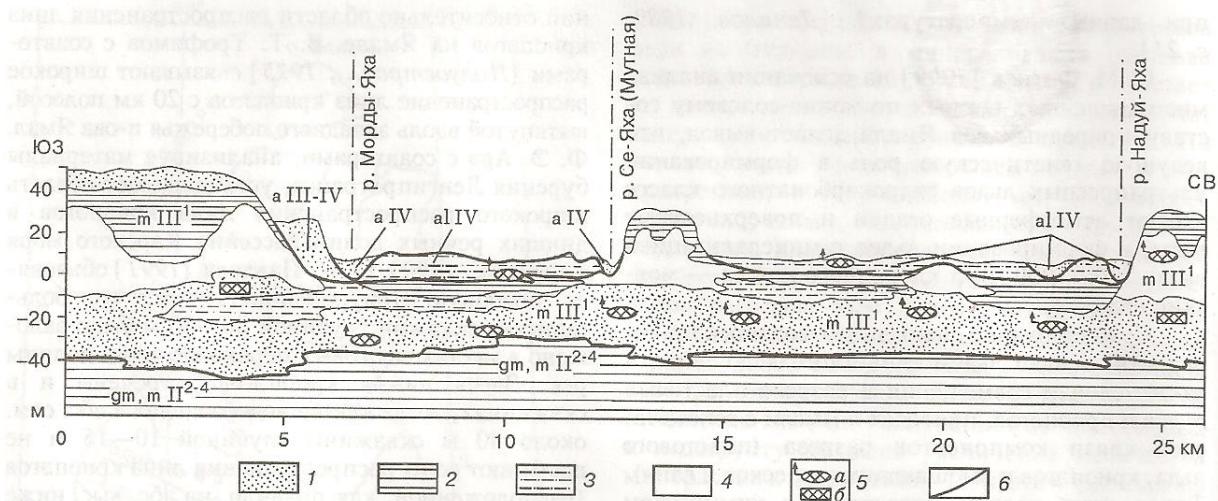


Рис. 2. Схематический разрез четвертичных отложений с линзами криопэгов и пластовыми льдами (Центральный Ямал).

1 — песок; 2 — глины; 3 — переслаивание песков, суглинков, глин; 4 — пластовый лед; 5 — линзы криопэгов: а — установленные, б — предполагаемые; 6 — граница комплекса с пластовым льдом; gm, m II²⁻⁴ — среднеплейстоценовые гляциально-морские и морские, m III¹ — верхнеплейстоценовые морские, а III—IV — верхнеплейстоцен-голоценовые аллювиальные, а IV — голоценовые аллювиальные, al IV — голоценовые аллювиально-озерные.

женерно-геологический мониторинг..., 1996], авторы составили схематический геологический разрез верхней части четвертичных отложений с линзами криопэгов и пластовыми льдами (см. рис. 2) по линии 6 (см. рис. 1). Схематический разрез четвертичных отложений имеет протяженность более 25 км, пересекая все типичные для района геоморфологические уровни: поймы

рек Надуй-Яха, Се-Яха, Морды-Яха, II аллювиальную и III морскую террасы. Пачка четвертичных отложений мощностью около 100 м вмещает залежи пластового льда мощностью более 40 м, перекрытые глинистыми отложениями. Под пластовыми льдами залегает выдержанная по простирианию пачка песков и супесей мощностью 30—40 м, которая вниз по разрезу сменяется глинами. В песках на различной глубине вскрыты линзы криопэгов. На схематическом разрезе отмечено местоположение линз криопэгов, как установленных бурением, так и предполагаемых (исходя из принятой авторами концепции).

Опубликованные к настоящему времени материалы и многолетние исследования авторов позволяют типизировать разрезы четвертичных отложений с линзами криопэгов и пластовыми льдами для района Центрального Ямала. На рис. 3 изображены схематические колонки скважин, на которых представлены: полный криолитологический разрез (см. рис. 3, а) и разрезы с выпадением отдельных компонентов (см. рис. 3, б, в). Эти типизированные разрезы позволили интерпретировать данные бурения. Полный разрез встречается за пределами речных долин или на их молодых участках, где не происходило полного вытаивания пластового льда, например в бассейнах рек Нерома-Яха и Нгэрм-Лымбадъяха (см. рис. 1, точка 2) [Лейбман и др., 1991]. В древних долинах крупных рек пластовый лед вытаивал и поэтому в геологическом

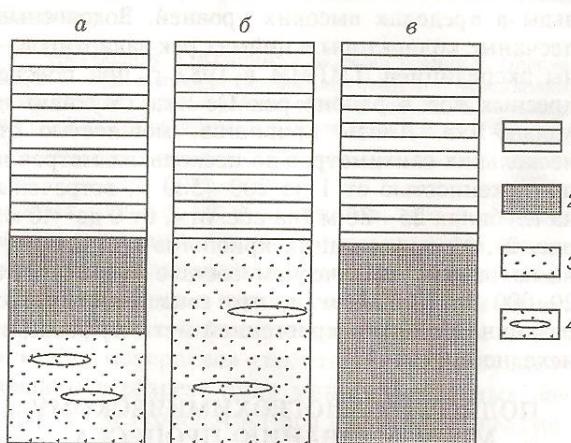


Рис. 3. Криолитологические типы разрезов с пластовыми льдами, вмещающими их отложениями и линзами криопэгов.

Полный криолитологический разрез (а); криолитологические разрезы с выпадением компонента — пластового льда (б), линзы криопэгов (в). 1 — глины; 2 — лед; 3 — пески; 4 — пески с линзами криопэгов.

КРИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

разрезе этот компонент отсутствует, например, в пойме р. Юрибей (см. рис. 1, точка 1; рис. 3, б) [Павлова, 1991]. Свидетельством того, что льды существовали, могут служить участки молодых долин, где пласти льда частично сохранились, например, участок долины р. Се-Яха (Мутная) (см. рис. 1, точка 3; фотография на обложке) [Инженерно-геологический мониторинг..., 1996]. В части изученных разрезов под пластовым льдом не встречены линзы криопэгов (см. рис. 3, в) [Пармузин, Суходольский, 1982]. По нашему мнению, криопэги и в этих разрезах существуют. Они не встречены при бурении скважин на водораздельных поверхностях в связи с тем, что либо подошва льда глубже забоя скважин, либо редкие глубокие скважины не достигли невыдержаных по простирианию линз под пластовыми льдами.

Криогидрохимическая характеристика разрезов

Химический состав воды из пластового и текстурообразующего льдов п-ова Ямал наиболее детально проанализирован С. М. Фотиевым [1999]. Минерализация пластовых льдов изменяется в широком диапазоне: от 10 до 8500 мг/л, но в большинстве проб она не превышает 300 мг/л. В зависимости от роста минерализации отмечается закономерный переход от ультрапресных льдов гидрокарбонатного класса к солоноватым льдам хлоридного класса. Преимущественно хло-

ридно-натриевый состав воды и минерализация в диапазоне 50—200 мг/л из расплавов текстурообразующего льда, по мнению С. М. Фотиева, свидетельствуют о „промерзании глин в субаквальных условиях и о непрерывности сохранения их мерзлого состояния“ [Фотиев, 1999, с. 63].

В районе оз. Ней-То (Центральный Ямал) пластовые льды характеризуются как хлоридно-натриевым, так и гидрокарбонатно-натриевым химическим составом. Минерализация воды из расплавов пластового льда изменяется от 26 до 1187 мг/л. Минерализация текстурообразующего льда невысокая и сокращается по мере приближения к пластовому (от 158 до 25 мг/л). Хлоридно-натриевый тип воды из шлиров льда в верхней части разреза глинистой толщи сменяется на контакте с пластом льда на хлоридно-гидрокарбонатно-натриевый или гидрокарбонатно-хлоридно-натриевый. Минерализация поровых растворов, выделенных из глин, перекрывающих пластовые залежи в районе оз. Ней-То, составляет в среднем 10 000 мг/л [Дубиков, 1982].

В районе междуречья рек Се-Яха (Мутная) и Морды-Яха минерализация воды из пластового льда изменяется от 26 до 176 мг/л в зависимости от прозрачности льда, а минерализация воды из текстурообразующего льда перекрывающих пород составила по трем определениям 226 мг/л [Leibman, 1996].

Результаты химического анализа поверхностных и атмосферных вод, расплавов из пластовых и текстурообразующих льдов, криопэга и поровых растворов вмещающих лед отложений

Номер геологического разреза*	Содержание образца	Общая минерализация, мг/л	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺ + K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
6	Атмосферные осадки (дождь) в районе р. Се-Яха (Мутная) 29.08.1988	38	7/37,5	9/33,9	10/28,6	9/67,9	2/17,8	1/14,3
6	Снежник в районе р. Се-Яха (Мутная) 04.08.1988	83	7/18,8	13/24,1	39/57,1	19/73,2	3/12,5	2/14,3
4	Река Се-Яха (Мутная) 04.09.1990	210	12/12,3	10/8	130/79,7	8/78,3	3/15,4	5/6,3
4	Поровые растворы Текстурооб-глин, перекрываю-щих лед	189	96/86,6	8/5,5	15/7,7	65/91,0	4/6,4	1/2,6
	2 м над плас-том льда	40 792	22 958/93,8	1292/3,9	1000/2,3	15 125/95,1	167/1,3	292/3,6
	0,2 м над пластиом льда	20 542	10 125/84,4	1583/9,9	1208/5,7	7375/94,8	125/1,7	125/3,5
3	Пластовый лед	78	24/56,7	17/30,0	10/13,3	23/81,7	3/13,3	1/5,0
	Криопэг под пластовым льдом	58 507	37 778/98,5	764/1,5	Нет	9229/37,1	6733/31,1	4183/31,8
	Поровые растворы песков, подстилающих пластовые льды	2407	507/39,6	529/30,7	654/29,7	418/50,5	214/29,7	100/19,8
	Морская вода	35 000	19 350/90	2700/9	70/1	11 100/79	420/3	1300/18

Содержание ионов в мг-л/мг-экв. %.

* См. рис. 1 и 3.

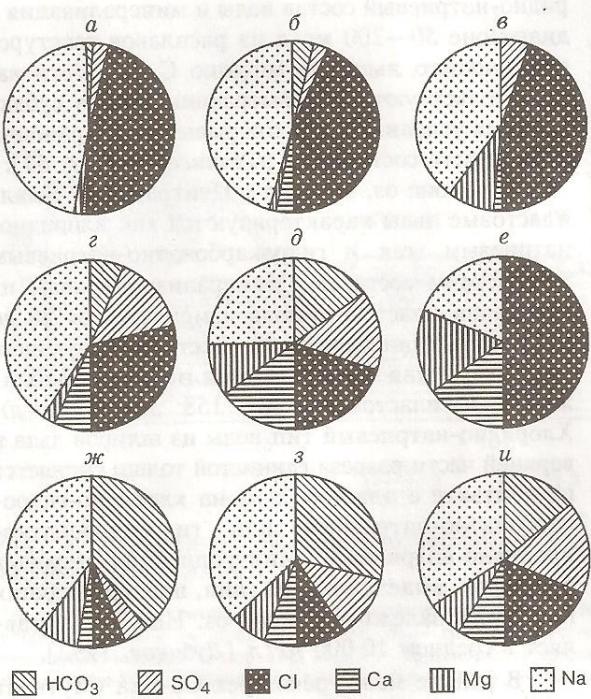


Рис. 4. Содержание ионов водорастворимых солей (мг/экв. %).

a — в перекрывающих лед глинах, *б* — текстурообразующем льде, *в* — морской воде, *г* — пластовом льде, *д* — песках, подстилающих пластовые льды, *е* — криопэзах под пластовыми льдами, *ж* — в р. Се-Яха (Мутная) 04.09.1990, *з* — снежнике в районе р. Се-Яха 04.08.1988, *и* — атмосферных осадках (дождь) в районе р. Се-Яха 29.08.1988.

Химический состав пластового и текстурообразующего льдов, поровых растворов и криопэзов был исследован на правом берегу р. Надуй-Яха, III морская терраса (см. рис. 1, точка 4). Здесь пластовый лед перекрыт засоленными глинистыми отложениями мощностью 2—10 м с толстоточечным текстурообразующим льдом. Под пластовым льдом мощностью более 10 м вскрыты напорные минерализованные воды хлоридно-натриевого состава. Минерализация порового раствора из глинистых отложений рассчитывалась для 24 % влажности минеральных прослоев глины [Дубиков, 1983] — при степени засоления глин 1,067 % она составила 40 792 мг/л, а ближе к залежи — 20 542 мг/л (таблица). Минерализация расплава из пластового льда не превышает 78 мг/л, тогда как воды под ним содержат солей 58 507 мг/л. Авторам не удалось получить анализы химического состава водных вытяжек из песков, подстилающих пластовые льды, для этого разреза. Поэтому были привлечены данные по керну параметрической скважины, пробуренной в том же районе, в 20 км южнее

р. Надуй-Яха, которые опубликованы в работе В. И. Соломатина, М. А. Коняхина [1997] (см. рис. 1, точка 3). Влажность льдонасыщенных песков на глубине 28 м составила 27 % при степени засоления песка 0,06 %, таким образом, минерализация порового раствора, содержащегося в песках до промерзания, составляла более 2200 мг/л (см. таблицу). В. И. Соломатин и М. А. Коняхин, анализируя результаты лабораторных исследований песков, подстилающих льды, отмечают их довольно пресный состав при преобладающем морском спектре ионов. „Образцы [песка — прим. авт.], взятые с глубины 18,3 и 20,6 м, диагностированы (по методу А. В. Суркова) как морские, накапливающиеся в подводной части пляжа на участке забуривания волн...“ [Соломатин, Коняхин, 1997, с. 178—179].

На рис. 4 показаны круговые диаграммы, в которых отражено типичное процентное содержание ионов водорастворимых солей. Все химические анализы собраны в три группы.

В первой группе структуры ионного состава поровых растворов из глин и расплавов из текстурообразующих льдов в этих глинах сравниваются с ионным составом морской воды (см. рис. 4, *a*, *b*, *в*). Как видно из приведенного рисунка, по структуре ионного состава поровые растворы глин и текстурообразующих льдов скожи с морской водой. Содержание хлор-иона в глинах уменьшается от 94 до 84 % с приближением к пласту льда, в текстурообразующем льде хлор-иона 87 %, тогда как в морской воде хлор-иона 90 %. Содержание ионов SO_4^{2-} уменьшается от морской воды к поровым растворам глин от 9 до 5,4 %, в текстурообразующем льде сульфат-иона — 5,5 %. В том же направлении идет увеличение содержания ионов HCO_3^- — от морской воды к текстурообразующим льдам. Среди катионов в структуре ионного состава поровых растворов глин, по сравнению с морской водой, повышается роль Na^+ и K^+ (до 95 %) и понижается роль Mg^{2+} (до 2,6 %). Для текстурообразующих льдов характерно увеличение иона Ca^{2+} , по сравнению с составом морской воды и поровыми растворами глин (от 1,7 до 6,4 %).

Во второй группе структура ионного состава расплавов из пластового льда сравнивается с поровым раствором подстилающих лед песков и составом криопэза (см. рис. 4, *г*, *д*, *е*), а также структурой ионов первой группы. В расплаве из пластового льда иона хлора существенно меньше (56,7 %), по сравнению с его содержанием в первой группе анализов, а количество сульфатов и гидрокарбонатов больше (30 % против 5,5 и 13 против 7,7 %, по сравнению с текстурообразующим льдом). Ближе по структуре ионного состава пластовые льды и пески, их подстилающие.

КРИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

Содержание сульфатов в пластовых льдах и подстилающих их песках 30,0 и 30,7 %, хлоридов — 56,7 и 39,6 %, а гидрокарбонатов — 13,3 и 29,7 % соответственно (см. рис. 4, г, д).

Структура ионного состава атмосферных осадков, выпадающих на континенте, и поверхностных вод, которые образуют третью группу (см. таблицу; рис. 4, ж, з, и), отличается по соотношению ионов от структуры пластовых льдов (см. рис. 4, г). Из анионов в атмосферных осадках и поверхностных водах преобладают гидрокарбонаты. Их доля особенно велика в речных водах, что связано с присутствием большого количества углекислоты. Доля гидрокарбонатов в атмосферных осадках, приносимых со стороны моря, может уменьшаться, по сравнению с поверхностными водами, за счет увеличения доли ионов хлора.

Из анализа структуры ионов, показанной на рис. 4, следует, что скорее всего, источником воды для образования пластового льда служили водонасыщенные пески, подстилавшие морские глины. Некоторое различие в их ионном составе можно объяснить перераспределением ионов и солей при промерзании. Экспериментально установлено, что сульфатов во льду, по сравнению с исходным раствором, больше, а содержание гидрокарбонатов определяется скоростью замерзания раствора (при медленном замерзании доля ионов HCO_3^- , попадающих в лед, больше [Кореновская, Тарасов, 1968]). В песке при понижении температуры осаждается кальцит и мирабилит. В свою очередь, часть солей из песка при промерзании отжимается вниз, формируя остаточный раствор. Его концентрация при промерзании песчаной толщи постоянно возрастает. Формируются линзы криопэгов различной мощности и на разной глубине. Они содержат растворимые соли хлора с низкой температурой эвтектики.

Процесс формирования льда авторам представляется следующим образом. После того, как граница раздела фаз миновала перекрывающую глину, началось промерзание водоносного песка сверху и начал формироваться пластовый лед. Со временем остаточный раствор в песке приобрел повышенную концентрацию, вследствие чего формирование льда прекратилось. Песок начал промерзать, когда в результате естественной конвекции концентрация порового раствора стала соответствовать температуре замерзания, а вытесненные рассолы фиксировались в виде линз, содержащих водорастворимые соли с низкой температурой эвтектики. В песке содержится существенно меньше солей, чем содержалось в поровом растворе до промерзания, поскольку эффективность их отжатия возрастает при промерзании сверху и с увеличением концентрации

насыщающего раствора [Романов, Левченко, 1989]. Линзы криопэгов, как правило, приурочены к нижним частям песчаной пачки, что также указывает на промерзание осадков сверху вниз. В дальнейшем эти криопэги проходят различные стадии криогенной метаморфизации. По нашим данным (см. рис. 1, точка 4; таблицу), в криопэге под пластовым льдом гидрокарбонаты отсутствуют (выпали в осадок во льду и в песке), а содержание сульфат-иона очень низкое (1,5%, выпал в осадок при понижении температуры). В результате содержание хлор-иона в линзе криопэга составляет 98,5 % (см. таблицу). Такая структура ионного состава криопэга является характерной чертой криогенного преобразования солевого состава морской воды при температуре -15°C [Фотиев, 1996].

КРИОГИДРОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТОВОГО ЛЬДА ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА

Обобщая выявленные закономерности перераспределения ионов, авторы предлагают криогеохимическую модель эпигенетического промерзания морских песчано-глинистых отложений, сопровождающегося формированием пластовых льдов. Концептуально модель формулируется следующим образом: источником воды для мощных залежей пластовых льдов являются подземные воды, состоящие из морских вод, разбавленных атмосферными и поверхностными водами. Часть вод участвовала в водообмене, часть шла на формирование пластового льда, и, наконец, часть наиболее концентрированных рассолов образовывала линзы криопэгов. Промерзание началось после выхода трансгрессивной пачки отложений на поверхность (или на мелководье). На контакте песок/глина в условиях относительно стабильной отрицательной температуры формировался пластовый лед.

На рис. 5 показаны направления перераспределения ионов при положительных и отрицательных температурах, характеризующие систему: мерзлые породы—пластовый лед—криопэги. Стрелками показано движение ионов от атмосферных осадков через поверхностные воды в водоносный коллектор до начала его промерзания. С атмосферными осадками в поверхностные воды попадают сульфаты и гидрокарбонаты, а также ионы хлора и натрия, которые приносятся дождями с моря. Поверхностные воды в большом количестве содержат как гидрокарбонат-ион, так и сульфат- и натрий-ионы, которые попадают в эти воды с поверхностным стоком [Лейблман, Стрелецкая, 1996]. Пресные воды суши поступают в подземный коллектор наряду с морскими и разбавляют их. Из моря в водоносный песок поступают ионы, характерные для

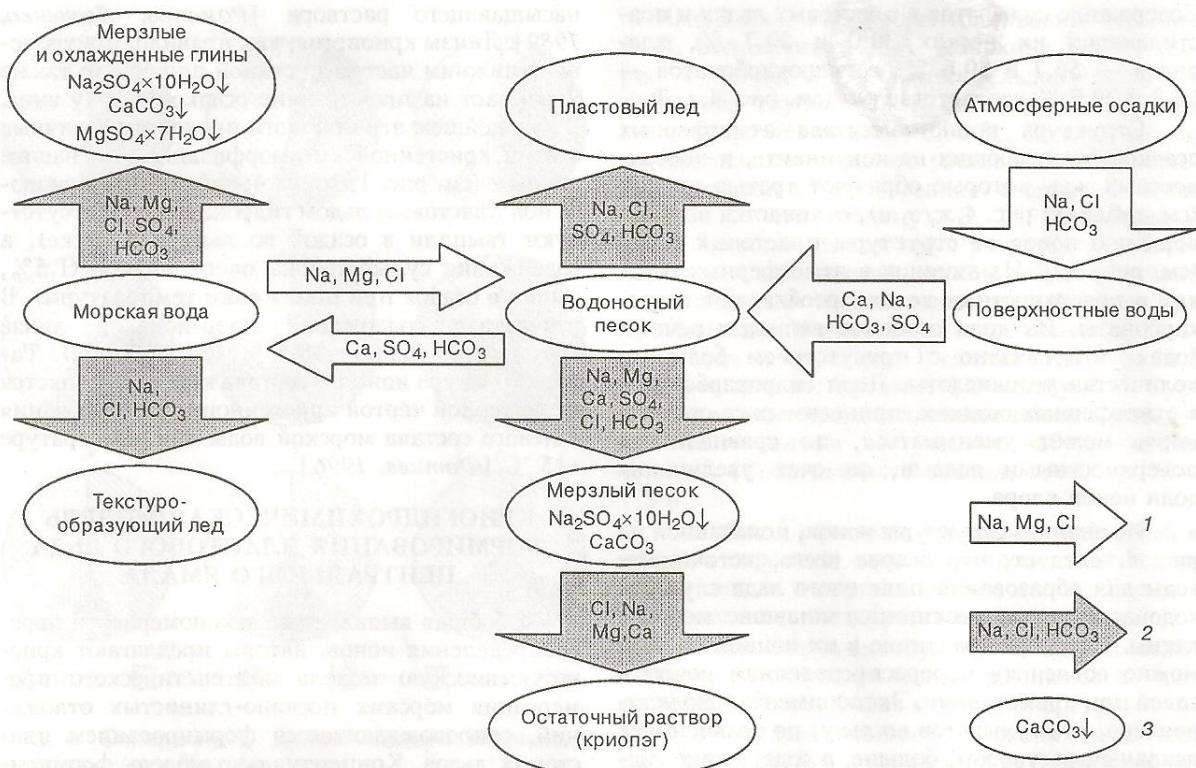


Рис. 5. Криогеохимическая схема перераспределения ионов в растворах при формировании мерзлых пород, пластовых льдов и линз криопэгов.

Направления перераспределения ионов: 1 — при положительных температурах; 2 — при отрицательных температурах; 3 — выпадение солей из растворов.

морской воды — Cl^- , Na^+ и Mg^{2+} , в море при разгрузке подземных вод приносятся ионы HCO_3^- и SO_4^{2-} . В результате формируется водоносный песчаный горизонт, в котором морские воды смешиваются с континентальными. После выхода морских отложений на поверхность или мелководье и начала их промерзания в перекрывающих глинах сохраняются и частично накапливаются морские соли [Основы..., 1995]. Из свободной и пленочной воды образуется текстурообразующий лед, в котором соотношение ионов близко к составу морской воды. Однако в нем увеличивается содержание ионов HCO_3^- и Ca^{2+} , уменьшая „морской сигнал“. Это можно объяснить тем, что при понижении температуры резко возрастает растворимость газов (в том числе CO_2), которая повышает содержание углекислоты в водных растворах. Повышенное содержание органического вещества в морских отложениях также служит источником углекислоты и Ca^{2+} [Еришов, 1986]. Со временем фронт промерзания достигает песчаного, насыщенного водами коллектора, где и происходит

дифференциация раствора. В формирующемся на границе глины и песка пластовой ледяной залежи химический состав льда отражает взаимодействие морских и континентальных вод. Из раствора в лед попадают все ионы, содержащиеся в растворе, однако в измененной пропорции. Сульфатов во льду, по сравнению с исходным раствором, будет больше [Кореновская, Тарасов, 1968]. Содержание гидрокарбонатов определяется скоростью замерзания раствора (при быстром замораживании раствора в лед попадает очень мало HCO_3^- [Кореновская, Тарасов, 1968]). Поскольку в пластовом льду наблюдается довольно высокое содержание HCO_3^- , то можно предположить медленное промерзание, соответствующее условиям сегрегационного накопления пластового льда. В песке при понижении температуры осаждается кальцит и мирабилит. Растворенная часть солей из песка при промерзании отжимается вниз, формируя остаточный раствор. Его концентрация при промерзании песчаной толщи постоянно возрастает. Незамерзшими остаются линзы криопэгов раз-

КРИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛАСТОВЫХ ЛЬДОВ

личной мощности и на разной глубине, содержащие соли хлора и имеющие низкую температуру эвтектики.

ВЫВОДЫ

Использование криогеохимического метода при анализе данных по пластовым льдам Центрального Ямала позволило заключить следующее.

1. Встречающийся на Ямале тип разреза, включающий пластовые льды, перекрытые глиной и подстилаемые песком с линзами криопэгов, свидетельствует о возможной генетической связи между компонентами этой системы в условиях ее формирования в береговой зоне морей.

2. При рассмотрении компонентов и системы в целом, удалось выделить группы геохимически связанных напрямую или опосредованно объектов. Напрямую связаны морские седиментационные соли и глинистые отложения с текстурообразующим льдом, а также морские седиментационные соли и соли континентальных вод с песчаными отложениями, подстилающими пластовые льды. Опосредованно связаны пластовый лед и криопэги с морскими седиментационными солями и солями поверхностных вод через процессы дифференциации растворов в песчаных породах при их промерзании.

3. Формирование системы мерзлые породы—пластовые льды—криопэги представляется как процесс промерзания вышедших на поверхность или на мелководье засоленных морских глин, подстилаемых песками, содержащими опресненные континентальными морскими водами, и формирование пластового льда на границе раздела глина/песок с образованием в последнем остаточных рассолов-криопэгов.

Авторы благодарят проф. С. М. Фотиева за ценные замечания и советы при обсуждении статьи.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС (гранты № 2329 и 2211).

Литература

- Анисимова Н.П., Крицук Л.Н. Использование криохимических данных при изучении генезиса залежей подземного льда // Проблемы геокриологии. М., Наука, 1983, с. 230—239.
- Аро Ф.Э., Боровикова Н.В., Слепышев В.И. Криопэги в нижних р. Юрибей на Ямале // Линейные сооружения на неизмермых грунтах. М., Наука, 1990, с. 60—67.
- Великоцкий М.А. О пластовых льдах на песчаных косах Печорского берегового бара // Проблемы общей и прикладной геокриологии Севера. М., Изд-во МГУ, 2001, с. 148—153. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 454 с.
- Гречишев С.Е., Шешин Ю.Б., Гречишцева О.В. Моделирование сегрегационного формирования подземных пластовых льдов в различных геологических условиях // Криосфера Земли, 2000, т. IV, № 4, с. 57—66.
- Данилов И.Д. Пластовые льды и субаквальный криолитогенез // Геокриологические исследования. М., Изд-во МГУ, 1989, с. 16—29.
- Данилов И.Д., Булдович С.Н., Луковкин Д.С. Модель динамики теплообмена в породах Карского шельфа и палеошельфа в позднем плейстоцене—голоцене и субмаринный криолитогенез // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 54—60.
- Дубиков Г.И. Парагенез пластовых льдов и мерзлых пород Западной Сибири // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, Кн. изд-во, 1982, с. 24—42.
- Дубиков Г.И. Геохимические исследования пластовых льдов и мерзлых пород // Вопросы региональной и инженерной геокриологии. М., Стройиздат, 1983, с. 52—73.
- Дубиков Г.И., Иванова Н.П. Засоленные мерзлые грунты и их распространение на территории СССР // Засоленные мерзлые грунты как основания сооружений. М., Наука, 1990, с. 3—9.
- Дубиков Г.И., Корейша М.М. Ископаемые — инъекционные льды на полуострове Ямал // Изв. АН СССР, Сер. геогр., 1964, № 5, с. 58—65.
- Ершов Э.Д. Физико-химия и механика мерзлых пород. М., Изд-во МГУ, 1986, 336 с.
- Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала: В 2-х т. Т. II. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения / В.В. Баулин, В.И. Аксенов, Г.И. Дубиков и др. Тюмень, ИПОС СО РАН, 1996, 240 с.
- Коняхин М.А., Михалев Д.В., Николаев В.И. Геосистемные исследования пластовых льдов на востоке п-ова Ямал (район оз. Вайваре-То) // Проблемы общей и прикладной геокриологии Севера / Под. ред. В.И. Соломатина. М., Изд-во МГУ, 2001, с. 154—163.
- Корейша М.М., Хименков А.Н., Брыксина Г.С. Условия залегания и строение пластовых залежей подземного льда района оз. Ней-То (п-ов Ямал) // Вопросы региональной и инженерной геокриологии. М., Стройиздат, 1983, с. 73—88.
- Кореновская И.М., Тарасов М.Н. К вопросу о формировании ионного состава и минерализации льда пресных вод при различных условиях // Гидрохимические материалы. Т. XLVII. Новоцеркесск, 1968, с. 77—87.
- Крицук Л.Н. Криогидротектоника и подземные льды Западной Сибири // Матер. II конф. геокриологов России (МГУ, 6—8 июня 2001 г.). Т. 3. М., Изд-во МГУ, 2001, с. 155—163.
- Крицук Л.Н., Поляков В.И. Использование гидрохимических и изотопных методов для изучения подземных льдов // Инженерная геология, 1988, № 3, с. 91—98.
- Лейбман М.О., Лахтина О.В., Титова И.Р., Микляев С.М. Особенности распространения рельефообразующих криогенных процессов на западе Ямала // Денудация в криолитозоне. М., Изд-во МГУ, 1991, с. 92—99.
- Лейбман М.О., Стрелецкая И.Д. Миграция химических элементов и ионов в сезонно-талом слое и верхнем горизонте многолетнемерзлых пород в связи с процессами термоденудации на Ямале // Матер. I конф. геокриологов России: Сб. докл. Кн. 2. М., МГУ, 1996, с. 390—398.
- Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли, 1998, т. II, № 4, с. 51—57.
- Основы геокриологии. Ч. 1: Физико-химические основы геокриологии / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
- Павлова О.П. Особенности формирования подземных вод в северной части Западно-Сибирского артезианского бассейна // Мерзлые породы и криогенные процессы. М., Наука, 1991, с. 79—84.
- Павлова О.П., Иванова Н.В. Закономерности формирования криопэгов в пределах Прикарского криоартбассейна // Формирование подземных вод криолитозоны. Якутск, 1992, с. 14—22.
- Пармузин С.Ю., Суходольский С.Е. Пластовые льды среднего Ямала и их роль в формировании рельефа // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, Кн. изд-во, 1982, с. 51—61.
- Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк). М., Изд-во МГУ, 1975, 248 с.
- Попов А.И. О субмаринном типе криодиагенеза // Инженерная геология, 1991, № 6, с. 48—60.

- Романов В.П., Левченко Г.П. Миграция солей в промерзающих грунтах // Инженерная геология, 1989, № 2, с. 57—65.
- Соломатин В.И., Коняхин М.А. Криолитогенез и стратиграфия мерзлой толщи Центрального Ямала // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск, Наука, 1997, с. 173—182.
- Стрелецкая И.Д. Закономерности распространения и формирования засоленных мерзлых грунтов и криопегов севера Западного Ямала (на примере Бованенковского ГКМ): Автодис. ... канд. геол.-мин. наук. М., ПНИИИС, 1991а, 21 с.
- Стрелецкая И.Д. Пластовые залежи льда, засоленные мерзлые грунты и криопеги Западного Ямала, их генетическая связь и взаимное расположение в разрезе // Ледниковый литоморфогенез, палеогеография четвертичного периода, современные экзогенные процессы и их геоэкологические аспекты. Рига, Латвийский ун-т, 1991б, с. 57.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопегов и вмещающих их пород Центрального Ямала // Консервация и трансформация вещества и энергии в криосфере Земли: Тез. междунар. конф. Пущино, 2001, с. 105—106.
- Тарасов А.М. Опыт применения изотопно-кислородного метода изучения подземных льдов при проведении инженерно-геокриологической съемки // Методы инженерно-геокриологической съемки. М., ВСЕГИНГЕО, 1990, с. 118—133.
- Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Дубиков Г.И. Криогенное строение и льдистость многолетнемерзлых пород Западно-Сибирской плиты. М., Изд-во МГУ, 1980, с. 246.
- Фотиев С.М. Закономерности криогенной метаморфизации химического состава морской воды // Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. 2: Подземные воды и наледи. Якутск, 1996, с. 16—26.
- Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 40—65.
- Шполянская Н.А. О конвективной природе дислокаций в отложениях с пластовыми льдами на севере Западной Сибири // Геоэкология (инженерная геология), 1993, № 3, с. 106—115.
- Шполянская Н.А. Криогенное строение дислоцированных толщ с пластовыми льдами как показатель их генезиса (север Западной Сибири) // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 4, с. 61—70.
- Leibman M.O. Results of chemical testing for various types of water and ice, Yamal Peninsula, Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 1996, vol. 7, No. 4, p. 287—296.
- Streletskaya I.D. Formation, distribution and dynamics of cryopegs, and associated problems of construction North-West Yamal peninsula, Russia // Cold regions engineering „A Global Perspective Proceeding“ (7th Internat. Cold Regions Speciality Conf., March 7—9, 1994). Edmonton, Alberta, p. 805—813.
- Streletskaya I.D. Cryopegs Responses to Periodic Climate Fluctuation // Permafrost, Proceed. of the 7th Internat. Conf. (June 23—27, 1998). Collection Nordicana, No. 57, Yellowknife, Canada, p. 1021—1025.

Поступила в редакцию
10 января 2002 г.