

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345.435.536

ГЕНЕЗИС И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТОВ  
ПОВТОРНО-ИНЪЕКЦИОННОГО ЛЬДА

С.М. Фотиев

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

Указаны типичные признаки пластов льда, залегающих *in situ* в полных разрезах морских осадков. Путем сравнения минерализации и химического состава льда, озерных и морских вод доказано, что пласты льда подпитывались озерными водами. Установлено, что пласты льда начали формироваться только после полной регрессии моря и значительно позднее многолетнего промерзания вмещающих их отложений. Доказано, что в процессе сегрегационного льдовыделения мощные пласты льда формироваться не могут. Определена ведущая роль процесса инъекционного льдообразования в формировании мощных пластов ультрапресных льдов внутри толщи мерзлых отложений, при этом источник, “питающий” пласт льда, находился вне, а не внутри вмещающих отложений. Рассмотрены условия проникновения озерной воды в толщу мерзлых отложений и послойного формирования пластов льда. Показано, что доставка воды от озера к пласту льда и ее продвижение на огромные расстояния обеспечивались высоким криогенным давлением, возникающим при промерзании воды в замкнутой озерной котловине.

*Пласт повторно-инъекционного льда, сегрегационное и инъекционное льдовыделение, криогенный напор*

GENESIS AND MECHANISM OF FORMATION OF THE LAYERS  
OF THE REPEATEDLY-INJECTIVE ICE

S.M. Fotiev

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

The typical features of the ice layers occurring *in situ* in the full sections of the marine sediments have been specified. The comparison of the mineralization and the chemical composition of the ice of the lacustrine and marine waters have proved that the ice layers had been saturated by the lacustrine waters. It was determined that the ice layers began forming only after the full sea regression and considerably later than the perennial freezing of the surrounding deposits. It has been ascertained that thick ice layers cannot be formed during the process of segregational accumulation. The leading role of the process of injective ice accumulation during the formation of the thick layers of the ultrafresh ice inside the strata of the frozen deposits have been proved. The source “feeding” the ice layer occurred to be not inside but outside the surrounding deposits. The conditions of penetration of the lacustrine waters into the strata of the frozen deposits and the layerwise formation of the ice layers have been examined. It was revealed that the delivery of the water from lake to ice layer and its transportation to enormous distances was provided by the huge cryogenic pressure occurring during ice freezing inside the closed lake depression.

*Layer of repeatedly-injective ice, segregation and injective ice accumulation, cryogenic head*

ВВЕДЕНИЕ

Обилие полигонально-клиновидных льдов и залежей подземных льдов в виде пластов, линз, жил и куполов – характерная особенность арктических равнин, неоднократно затопляемых морем в четвертичном периоде. На полуострове Ямал эта особенность была отмечена в отчетах геологич-

еских экспедиций уже более 60 лет назад. Однако научное изучение подземных льдов началось значительно позднее – в 1960–1964 гг. [Дубиков, Кореиша, 1964; Баулин, 1967]. Особое внимание геокриологи обращали на изучение залежей пластовых льдов, так как генезис и механизм образования

полигонально-жильных льдов (ПЖЛ)<sup>1</sup> уже не вызывают вопросов.

Залежи пластовых льдов также достаточно хорошо изучены. Они обнаружены и исследованы в четвертичных отложениях разного возраста (от среднего неоплейстоцена до голоцена) и различного генезиса (морские, прибрежно-морские, ледниковые и реже – озерные, аллювиальные). Залежи пластовых льдов имеют различную форму (линзы, пласты, жилы и др.), разную мощность и видимую протяженность. Сам термин “пластовый лед” в современном понимании, как правильно подметил Г.И. Дубиков, “носит собирательный характер, поскольку не отражает не только генетическую сторону явления, но часто и морфологические особенности ледяных тел” [2002, с. 166]. К пластовым льдам исследователи относят практически все залежи подземных льдов и даже те, которые к пластам льда не имеют никакого отношения. Например, линзы льда, сформировавшиеся при промерзании до дна мелких термокарстовых озер, или погребенные морские льдины [Васильчук, 2010]. Может быть именно поэтому до настоящего времени геокриологи не пришли к единому мнению относительно места образования залежей подземного льда (на поверхности земли или ниже, внутри вмещающих их отложений). Нет единой точки зрения и на генезис “материнской” воды, сформировавшей залежи подземных льдов. Дискуссионным остается вопрос о генезисе и механизме формирования пластов льда.

Особое место среди многообразия мелких и крупных залежей подземных льдов занимают пласты подземного льда. Пластом льда следует называть монолитное ледяное тело, “ограниченное двумя более или менее параллельными плоскостями напластования, имеющее одинаковую мощность и занимающее большие площади” [Геологический словарь, 1955, с. 147]. Это наиболее крупные скопления подземных льдов. Они имеют самую большую (до 30–40 м) толщину льда и значительную (до 1–3 км) протяженность [Дубиков, 2002], а объем льда в некоторых пластах достигает несколько миллионов кубометров<sup>2</sup>. Неудивительно, что к настоящему времени детально изучены морфология пластов, их форма и размеры, строение, состав и криогенная текстура пластов льда, а также химический состав отдельных слоев льда в пласте, текстурообразующих льдов и порового раствора во вмещающих породах. Выяснить генезис и механизм формирования пластов ультрапрес-

ного льда в мерзлых, морских, засоленных отложениях – основная задача статьи.

## ПЛАСТЫ ЛЬДА

Пласты льда в морских отложениях салехардской, казанцевской и зырянско-каргинской равнин идентичны по морфологии, криогенной текстуре и химическому составу льда. Это свидетельствует о том, что конкретное сочетание природных факторов и условий, обеспечивающих формирование мощных пластов пресного льда в толще мерзлых засоленных морских отложений, неоднократно повторялось в разные геологические эпохи.

Отложения морских равнин с мощными клиньями и пластами льда под воздействием эрозионных, термокарстовых и термоплатационных процессов активно разрушались и в субмаринных, и в субаэральных условиях. Полные разрезы мерзлых отложений с пластами льда *in situ* сохранились только в останцах древних равнин. Подтверждением сказанному служит значительная (до 1–2 %) засоленность всей толщи морских отложений. Эти разрезы и рассматриваются автором в качестве эталона. Опираясь на работы предшественников [Дубиков, Корейша, 1964; Баулин, 1967; Баулин, Дубиков, 1970; Дубиков, 1982, 1983, 2002; Корейша и др., 1982; Пармузин, Суходольский, 1982; Стрелецкая и др., 2002, 2006; Каневский и др., 2005; Крицук, 2010; Васильчук, 2010, 2012; Слагода и др., 2012], перечислим признаки, типичные для пласта льда.

*Толщина льда* до 30–40 м.

*Протяженность* до 1–3 км.

*Объем льда* – несколько миллионов кубометров.

*Невыраженность в современном рельефе*, несмотря на большую мощность, значительную протяженность пластов и огромные объемы подземного льда.

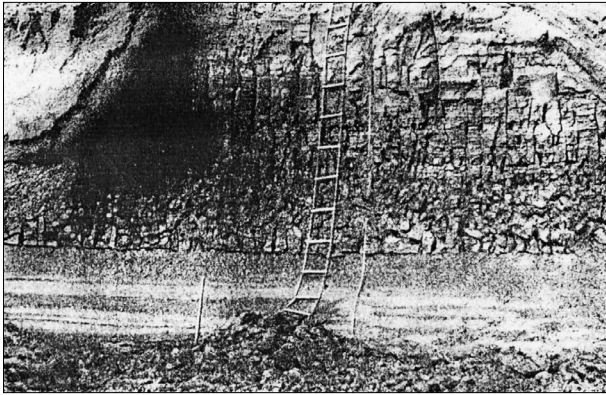
*Приуроченность к контакту пачки песка и пачки глин морского генезиса*. Обычно (83 %) пласты льда перекрываются пачкой глин [Дубиков, 2002].

*Субгоризонтальная слоистость льда*, которая четко соответствует горизонтальной слоистости морских отложений, перекрывающих пласт льда (рис. 1).

*Слои стекловидного льда чередуются со слоями льда, содержащими минеральные включения и пузырьки воздуха*. Включения представлены гли-

<sup>1</sup> Термин полигонально-жильный, или повторно-жильный, лед (ПЖЛ) прочно, но ошибочно вошел в геокриологическую литературу. Если акцентировать внимание на весьма специфической клиновидной форме залегающего ледяного тела, то подземный лед, сформировавшийся в результате многократного замерзания поверхностной воды в морозобойных трещинах, имеющих форму клина и образующих на поверхности полигональную решетку, следует называть полигонально-клиновидный, или повторно-клиновидный, лед (ПКЛ).

<sup>2</sup> Необходимо учитывать, что размеры пластов и объемы пресного льда в эпохи их формирования, вероятно, были в несколько раз больше.



**Рис. 1.** Пласт льда в нижнем течении р. Сеяха [Баулин, 1967].

ной, песком, гравием и галькой. Слои ледогрунта, в которых содержание минеральных частиц достигает 50 %, встречаются реже. Толщина слоев изменяется от 2 до 10 см и более.

*Химический состав льда* гидрокарбонатный кальциевый (иногда натриевый), лед ультрапресный с минерализацией от 20 до 120 мг/л [Фотиев, 2003, 2012]<sup>3</sup>.

*Минерализация текстуробразующих льдов* в пачке глин снижается с приближением к пласту льда, а химический состав льда обогащается ионами  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Ca}^{2+}$ . Это свидетельствует о существенном влиянии ультрапресных вод, внедрившихся в пачку мерзлых глин, на минерализацию и химический состав засоленных текстуробразующих льдов морского генезиса [Фотиев, 2003, 2012, 2014]<sup>4</sup>.

*Наличие 10–12-метровой зоны раздробленных, сильно (до 60–80 %) льдистых мерзлых глин с толстошлировой крупносетчатой криогенной текстурой*, в которой высота более толстых (до 10–20 см) вертикальных шпиров достигает 6 см. Залегание зоны на кровле пласта льда свидетельствует о поступлении воды снизу, а также указывает на залегание морских отложений, включающих пласт льда, *in situ* [Дубиков, Корейша, 1964; Баулин, 1967]<sup>5</sup>.

До настоящего времени на огромных территориях морских равнин в результате избирательного вытаивания некогда мощных пластов с большим объемом льда сохранились лишь разрозненные не-

большие ледяные тела, иногда самой причудливой формы. Относить такие ледяные тела к пластам льда можно лишь в том случае, если в них сохранились, хотя бы частично, типичные признаки пластов льда.

Условия формирования и сохранения пластов льда в силу разных, пока не до конца выясненных причин не были одинаковыми даже в пределах п-ова Ямал. Достаточно сравнить обилие мощных (30–40 м) пластов льда в районе Бованенковского газоконденсатного месторождения (ГКМ) и тонкие (2–4 м) пласты в районах Харасавейского ГКМ и метеостанции Марре-Сале. По мнению автора, прежде чем рассматривать вопрос о механизме доставки воды к пласту льда, необходимо решить две взаимосвязанные проблемы: найти источник воды, который на протяжении длительного отрезка времени мог обеспечивать регулярное поступление в толщу морских отложений огромных объемов пресной воды, и определить время формирования пласта льда и вмещающих его отложений. Эти проблемы до настоящего времени дискуссионны, но здесь будут рассмотрены кратко, так как ранее при выявлении химического состава и генезиса “материнской” воды, сформировавшей пласты льда в районах озера Нейто, Бованенковского ГКМ и метеостанции Марре-Сале, они были детально исследованы автором [Фотиев, 2003, 2012, 2014].

#### ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ГЕНЕЗИС ВОДЫ, СФОРМИРОВАВШЕЙ ПЛАСТЫ ЛЬДА

Минерализацию и химический состав пластовых льдов с 1964 г. изучала большая группа геокриологов (В.В. Баулин, Ю.К. Васильчук, Г.И. Дубиков, М.М. Корейша, М.О. Лейбман, Е.А. Слагода, И.Д. Стрелецкая и др.). Анализ результатов этих исследований позволил автору установить, что, опираясь на немногочисленные химические анализы проб льда и морской генезис засоленных вмещающих отложений, ученые уверились в активном участии морской воды в формировании химического состава пластовых льдов. Тем не менее автор на основе детального изучения минерализации и ионно-солевого состава атмосферных осадков, озерных, морских и подземных вод пришел к выводу, что “материнская” вода, сформировавшая пласты льда, поступала в мерзлые морские отложения из термокарстовых озер [Фотиев, 2003, 2012, 2014].

<sup>3</sup> Тем не менее ряд геокриологов считают, что пласт льда формировался за счет морской воды, поэтому его состав хлоридный натриевый с повышенной (до 350 мг/л) минерализацией [Слагода и др., 2012, с. 17]. Более подробно “морская” гипотеза будет рассмотрена ниже.

<sup>4</sup> По мнению Г.И. Дубикова: “Резкое (в несколько раз) сокращение концентрации поровых вод на контакте с пластами льда свидетельствует о существенном выщелачивании пород в связи с самопроизвольным расслоением осадков на породу и свободную воду при продвижении фронта промерзания и оттаивания воды в буферную зону” [2002, с. 199].

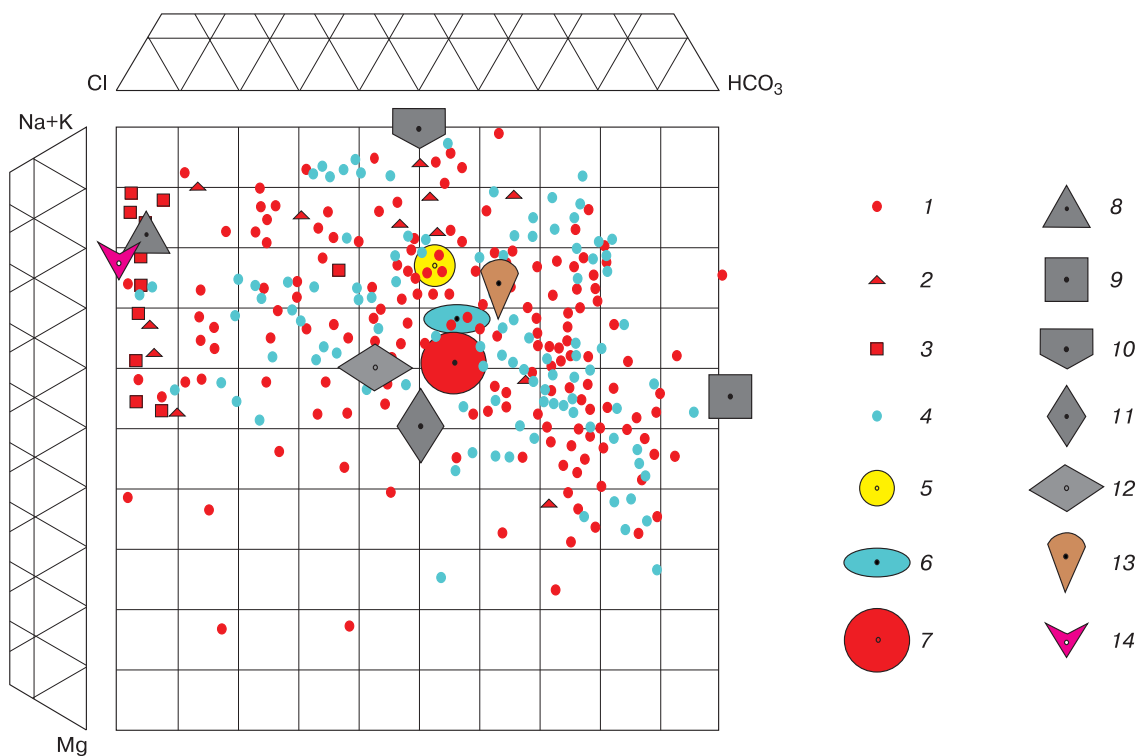
<sup>5</sup> Отсутствие зоны раздробленных мерзлых глин на кровле пласта льда указывает на уничтожение пачки мерзлых глин, некогда перекрывавших пласт льда.

Таким образом, в настоящее время существует две точки зрения на генезис воды, сформировавшей пласты льда: озерный и морской. Решить эту проблему можно только путем тщательного сравнения минерализации и ионно-солевого состава льда в пластах озерной и морской воды.

*Озерные воды*, по мнению автора, – единственный источник ультрапресных вод, способный обеспечить регулярное поступление огромных объемов ультрапресной воды в толщу мерзлых морских засоленных отложений и формирование мощных (до 30–40 м), выдержанных по простиранию, слоистых пластов льда. Этот вывод подтверждается гидрохимическим родством ионно-солевого состава пластовых льдов и озерных

вод. На диаграммах С.А. Дурова [1961] точки химического состава льда и озерной воды буквально перемешаны между собой (рис. 2) [Фотиев, 2012, 2014].

*Морские воды*. Взгляды геокриологов, поддерживающих “морскую” гипотезу, иллюстрируют следующие цитаты. Исследования пластовых льдов и вмещающих их отложений на протяжении 40 лет позволили Г.И. Дубикову подтвердить правильность позиции, высказанной им совместно с М.М. Корейшей еще в 1964 г., что “тесная гидрохимическая взаимосвязь поровых вод с подземными льдами свидетельствует также об их парагенезисе<sup>6</sup> и указывает на образование текстуробразующих и пластовых льдов за счет воды, со-



**Рис. 2.** Сопоставление химического состава (%-экв.) подземных пластовых льдов и озерных вод Ямала [Фотиев, 2012, рис. 3].

1–3 – точки ионного состава подземных льдов с минерализацией: 1 – до 300 мг/л (168 проб); 2 – от 300 до 1000 мг/л (15 проб); 3 – от 1000 до 10 000 мг/л (10 проб); 4 – точки ионного состава озерной воды (107 проб); 5–7 – точки среднего ионного состава: 5 – атмосферных осадков (43 пробы), 6 – озерных вод (107 проб), 7 – подземных льдов с минерализацией до 300 мг/л (168 проб); 8–12 – точки основных типов природных вод: 8 – морская вода современного океана, 9 – бикарбонатные воды, 10–12 – сульфатные воды (10 – зоны растворения мирабилита, 11 – зоны растворения гипса, 12 – зоны окисления сульфидов); 13 – точка криометаморфизованной озерной воды [Анисимова, 1981]; 14 – точка криометаморфизованной морской воды, охлажденной до температуры –15 °С (Крио–15°).

Примечание. Подробные сведения о химическом составе подземных льдов и природных вод Ямала опубликованы в [Фотиев, 1999].

<sup>6</sup> На основе тщательного анализа минерализации и химического состава текстуробразующих и пластовых льдов, пробы которых Г.И. Дубиковым [1982] отбирались на берегу оз. Нейто, автором доказано, что никакого парагенезиса не было, так как текстуробразующие льды формировались на основе морской воды, а пласт льда – на основе озерной воды. При этом они формировались не одновременно, а со значительным перерывом во времени [Фотиев, 2003].

державшейся на ранних стадиях диагенеза в промерзавших осадках” [Дубиков, 2002 с. 224]. “Скорее всего, источником воды для образования пластового льда служили водонасыщенные пески, подстилающие морские глины” [Стрелецкая, Лейбман, 2002, с. 21]. 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]. Е.А. Слагода с соавторами считают, что “расплавы льда (имеется в виду лед нижней залежи в районе Марре-Сале. – С.Ф.) характеризуются относительно повышенными значениями минерализации (до 350 мг/л) за счет хлоридов натрия (более 50 % от суммы солей), пониженным содержанием гидрокарбонатов кальция и магния (менее 10 %), что может свидетельствовать об активном участии в формировании льда поровых растворов из морских отложений” [Слагода и др., 2012, с. 17].

Основные недостатки “морской” гипотезы в том, что она не может объяснить, во-первых, каким образом морская вода хлоридного натриевого состава с минерализацией более 20 000 мг/л в поровом растворе пачки глин или в порах пачки засоленного песка трансформировалась в ультрапресную (20–140 мг/л) воду гидрокарбонатного кальциевого (натриевого) состава; во-вторых, как поры песка в пачке мощностью 20–30 м могут содержать огромные (несколько миллионов кубометров) объемы ультрапресной воды, столь необходимые для формирования мощного пласта льда и огромных подземных гидроакколитов; в-третьих, как в отдельные слои льда могли “проникнуть” глины, галька, щебень и даже водоросли, столь характерные для подозерных таликов тундровой зоны [Васильчук, 2010]. И наконец, до настоящего времени еще никем убедительно не доказано гидрохимическое родство морской воды и льда в мощных пластах льда.

Именно поэтому, по мнению автора, морские воды не могли участвовать в формировании пластов льда. Они начали формироваться в субаэральных условиях лишь после полного промерзания и пачки глин, и пачки песка.

### **ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТА ЛЬДА И ВМЕЩАЮЩИХ ЕГО ОТЛОЖЕНИЙ**

Проблема до настоящего времени остается дискуссионной. Никто из геокриологов (В.В. Баулин, Ю.К. Васильчук, Г.И. Дубиков, М.М. Корей-

ша, М.О. Лейбман, Е.А. Слагода, И.Л. Стрелецкая, А.Н. Хименков и др.) не попытался ответить на конкретный вопрос: когда началось формирование пластов льда – до полной регрессии моря или значительно позднее? Большинство геокриологов разделяют точку зрения Г.И. Дубикова, что пластовые льды формировались на ранней стадии диагенетического преобразования водонасыщенных морских отложений.

Проиллюстрируем сказанное цитатами. “Возраст инъекционных льдов (имеются в виду пласты льда. – С.Ф.) соответствует возрасту мерзлой толщи” [Дубиков, Корейша, 1964, с. 65]. Такой же точки зрения придерживался В.В. Баулин: “их возраст (имеются в виду пластовые залежи льда. – С.Ф.) определяется временем эпигенетического промерзания вмещающих отложений” [1985, с. 36]. И.Д. Стрелецкая с соавторами пишут: “Формирование пресных пластов льда могло происходить при промерзании насыщенных опресненной водой песков на границе раздела глина–песок в условиях мелководья или сразу после выхода из-под уровня моря” [2005, с. 258]. Ю.К. Васильчук утверждал, что “пластовые льды являются сингенетическими и гетерогенными” [2010, с. 66]. И далее: “на осушках, косах и отмелях пляжах, где шло сингенетическое или диагенетическое сегрегационное льдообразование, могли формироваться относительно маломощные пласты сегрегационного льда” [Там же, с. 66]. Е.А. Слагода с соавторами считают, что нижняя залежь пластового льда на мысе Марре-Сале “могла формироваться при эпигенетическом промерзании сверху в открытой системе по сегрегационному типу льдообразования с отжатием солей при миграции воды к фронту промерзания” [2012, с. 21]. Из приведенных цитат видно, что у геокриологов пока нет единой точки зрения на время формирования пластов льда: до полной регрессии моря или значительно позднее, уже в субаэральных условиях.

По мнению автора, реально решить эту проблему может только ответ на вопрос: какой водой “питался” пласт льда – морской или озерной? Поскольку автором убедительно доказано, что пласты льда “питались” озерной водой из термокарстовых котловин<sup>7</sup>, вопрос о времени формирования пластов льда и вмещающих их отложений решается однозначно. Пласты льда начали формироваться в субаэральных условиях после полной регрессии моря и значительно позднее многолетнего промерзания морских отложений, вмещающих пласт льда<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Для формирования в мерзлых отложениях морских равнин крупных термокарстовых озер и подозерных таликов нужен весьма продолжительный отрезок времени.

<sup>8</sup> Поэтому нельзя согласиться с выводом Ю.К. Васильчука, что “пластовые льды являются сингенетическими” [2010, с. 66], и с выводом В.В. Баулина, что “возраст пластов льда определяется временем эпигенетического промерзания вмещающих отложений” [1985, с. 36].

### МЕХАНИЗМ ДОСТАВКИ ВОДЫ К ПЛАСТУ ЛЬДА

Механизм формирования залежей пластовых льдов внутри мерзлых морских отложений Ямала давно обсуждается геокриологами. Рассматриваются два наиболее вероятных типа льдообразования: сегрегационный и инъекционный. По мнению автора, их различия определяются генезисом воды, участвующей в процессе льдообразования, местонахождением источника воды (внутри или за пределами отложений, вмещающих пласт льда) и механизмом доставки воды от источника до пласта льда<sup>9</sup>.

**Сегрегационное льдообразование.** Диагностические признаки сегрегационного льдообразования при формировании ледяного тела с точки зрения автора таковы.

*Источник воды* находится внутри вмещающих дисперсных отложений.

*Рыхлосвязанная, или капиллярная, вода* – главный “питающий” источник.

*Безнапорная миграция* – основной механизм доставки воды к ледяному телу в процессе промерзания вмещающих отложений.

*Ледяное тело* формируется сингенетически в процессе сегрегационного льдовыделения при промерзании вмещающих его отложений.

*Объем ледяного тела*, образовавшегося внутри вмещающих отложений, обычно невелик. Он не должен превышать (более чем на 9 %) объем свободной, рыхлосвязанной и капиллярной воды, содержащейся в промерзавших отложениях. При промерзании дисперсных отложений обычно формируются шпилы льда или тонкие линзы и прослойки льда.

*Гидрохимическое единство минерализации и химического состава сегрегационного льда и всех категорий воды*, содержащихся в промерзающих вмещающих отложениях, – важный критерий сегрегационного льдообразования.

Однако сторонники формирования пластов льда в процессе сегрегационного льдообразования (В.В. Баулин, Ю.К. Васильчук, Б.И. Втюрин, Г.И. Дубиков, М.М. Корейша и др.) акцентируют внимание на других признаках.

Приведем некоторые цитаты. “К настоящему времени большинство мерзлотоведов, занимающихся изучением пластовых вод Западной Сибири, разделяют обоснованное фактическим материалом представление об их внутригрунтовом происхождении” [Дубиков, 2002, с. 216]. “Преобладание сегрегационного льдовыделения при формировании ледяных тел (имеются в виду пласты льда. – С.Ф.) подтверждается такими характерными осо-

бенностями их строения, как параллельная слоистость и выдержанность элементарных слоев чистого льда и льда с примесью грунта на большом протяжении, залегающих согласно с покрывающими осадками” [Баулин, Дубиков, 1970, с. 186–187]. “При промерзании глинистых отложений, подстилаемых на глубине 10–30 м водоносными песками, на первом этапе формировалась параллельно-слоистая часть залежи за счет миграции воды” [Там же, с. 189]. Наличие в отложениях “грубодисперсного материала, содержащего свободную воду, – основное условие образования мощных пластов льда” [Дубиков, 2002, с. 209]. “Наиболее благоприятные условия для образования крупных залежей сегрегационного льда – близ контакта с водоносными крупнозернистыми отложениями в подошве, содержащей большие запасы свободной воды, способной трансформироваться в слабо связанную” [Втюрин, 1985, с. 61]. “Слои льда (имеется в виду сегрегационный лед. – С.Ф.) разной толщины чаще всего приурочены к контакту глинистых пород с подстилающими песчаными отложениями или трещиноватыми коренными породами, содержащими большие запасы воды, но встречаются и в разрезе глинистых пород” [Дубиков, 2002, с. 217]. И далее: “мощность пластов достигает 20–40 м, видимая протяженность – 200–600 м” [Там же, с. 222]. Ю.К. Васильчук пластовые залежи рассматривал как внутригрунтовые ледяные образования, “сформировавшиеся сингенетически в процессе сегрегационного, сегрегационно-инфильтрационного или сегрегационно-конжеляционного льдообразования при промерзании водонасыщенных разуплотненных толщ” [2010, с. 66]. Позднее Ю.К. Васильчук писал: “Сегрегационное льдообразование в условиях значительного переувлажнения или при наличии мощных водоносных горизонтов, располагающихся вблизи фронта промерзания, ведет к формированию мощных линз и пластов сегрегационного льда” [2012, с. 129]. Анализ работ геокриологов, считающих сегрегационное льдообразование ведущим процессом их формирования, убедил автора в однозначности вывода: мощные (до 30–40 м) пласты ультрапресного льда значительной (до 1–3 км) протяженности, залегающие в мерзлых засоленных отложениях, не могли сформироваться в процессе сегрегационного льдовыделения и тем более одновременно с многолетним промерзанием вмещающих их отложений.

Вывод обоснован: генетическим различием минерализации и химического состава льда и всех категорий воды в промерзающих морских отложениях; наличием в слоях льда глины, песка, гравия

<sup>9</sup> По мнению Г.И. Дубикова, критерий их различия – механизм доставки воды к фронту промерзания: “напорная миграция и замерзание свободной воды и пльвуна (инъекционный тип) или безнапорная миграция и замерзание связанной и капиллярной воды (сегрегационный тип)” [2002, с. 216].

и гальки, которые не могли проникнуть в пласт путем безнапорной миграции; незначительным объемом всех категорий воды в промерзающих морских отложениях, который в сотни и тысячи раз меньше объема воды, необходимого для формирования мощных пластов льда.

**Инъекционное льдообразование.** Диагностические признаки инъекционного льдообразования при формировании пласта льда с точки зрения автора таковы.

*Огромный напор воды* – необходимое условие инъекционного льдообразования пласта льда.

*Озерная вода* – главный источник, “питающий” пласт льда.

*Источник воды* находится вне вмещающих отложений. По отношению к ним пласт льда – однородное тело.

*Напорная флюация* – основной механизм доставки воды к пласту льда.

*Огромное криогенное давление, возникающее при промерзании озерной воды в замкнутой термокарстовой котловине*, – единственная сила, способная обеспечить внедрение больших объемов воды на значительные расстояния от источника питания.

*Озерная вода внедрялась в толщу мерзлых засоленных отложений в зоне контакта пачки глин и пачки песка в бортах котловины.* Инъекция воды повторялась многократно, что подтверждается четкой слоистостью пласта льда.

*Объем пласта льда* может во много раз превышать объем всех категорий воды, содержащейся во вмещающих отложениях до начала их промерзания.

*Гидрохимическое различие инъекционного льда в пласте и всех категорий воды, содержащихся в промерзающих вмещающих отложениях*, – важный критерий инъекционного льдообразования в пласте льда.

Однако многие геокриологи (В.В. Баулин, Ю.К. Васильчук, Б.И. Втюрин, Г.И. Дубиков, М.М. Корейша и др.) – сторонники ведущей роли инъекционного льдообразования в формировании пластов льда – акцентируют внимание на других признаках.

Проиллюстрируем сказанное цитатами. Г.И. Дубиков и М.М. Корейша писали: “залежи льда сформировались в результате внедрения и замерзания воды в период общего промерзания вышедших из-под уровня моря областей” [1964, с. 15]. В.В. Баулин и его коллеги пришли к выводу, что “крупные залежи льда образовались в процессе промерзания водоносных пород и линз” [Баулин, 1967, с. 142]. Главным условием формирования линзы или пласта инъекционного льда в промерзающих отложениях, по мнению В.В. Баулина и Г.И. Дубикова, следует считать “образование замкнутого водонасыщенного талика, в котором

при дальнейшем промерзании возникает большое давление, и вода или разжиженный грунт внедряются в промерзающие породы” [1970, с. 182]. По мнению Б.И. Втюрина: “Инъекционный тип залежей образуется в результате замерзания ограниченного замкнутого объема свободной воды, внедрившейся в промерзающую или мерзлую породу сбоку или снизу в процессе эпигенетического промерзания ММП” [1985, с. 62]. Позднее В.В. Баулин писал: “...инъекционные залежи льда возникли в результате промерзания молодых осадочных образований при наличии в них водоносных горизонтов” [1985, с. 140]. И далее: “Нами выделяются два основных их типа (имеются в виду залежи инъекционного льда. – С.Ф.): 1) пластовые залежи без заметного нарушения слоистости пород, но с зоной раздробленных льдонасыщенных отложений над кровлей, 2) залежи типа лакколитов, штоков с признаками внедрения масс воды... и деформации покрывающих пород с образованием складок” [Там же, с. 142]. Г.И. Дубиков утверждает: “Инъекционный тип залежей льда формируется в результате внедрения масс воды или пльвуна в промерзающие глинистые породы” [2002, с. 217]. Для этого необходимо “наличие в промерзающем глинистом массиве водоносных песчаных горизонтов, в которых вода находится под давлением, способным деформировать кровлю и нарушить первичное залегание глинистых пород [Там же с. 217]. Ю.К. Васильчук писал, что на осушках и косах “промерзание отложений было дифференцированным вдоль побережья, какие-то массивы промерзали активнее и масштабнее, другие более продолжительное время оставались тальмы и водоносными. Это приводило к образованию замкнутых водоносных таликовых зон, где создавались предпосылки к инъекционному льдоделению ... и формированию инъекционных пластовых льдов” [2010, с. 66].

Из приведенных цитат видно, что В.В. Баулин, Ю.К. Васильчук, Б.И. Втюрин, Г.И. Дубиков, М.М. Корейша и другие геокриологи считают возможным формирование мощных (до 30–40 м), протяженных (до 1–3 км) пластов ультрапресного инъекционного льда при следующих условиях: 1) одновременно с многолетним промерзанием вмещающих их морских отложений; 2) при существенном генетическом различии химического состава инъекционного льда и всех категорий воды во вмещающих отложениях; 3) при крайне незначительном объеме всех категорий воды в промерзающих отложениях, который в сотни и тысячи раз меньше объема воды, необходимого для формирования пласта льда; 4) при формировании криогенного давления в результате промерзания воды в замкнутых таликах, образовавшихся в слоях песка. В таких условиях в толще морских засоленных отложений, по мнению автора, мощные

Принципиальные различия условий формирования пластов льда при инъекционном льдообразовании

№ п/п	Суть различия	По С.М. Фотиеву	По В.В. Баулину и др.
1	Местоположение источника воды, "питающего" пласт льда	За пределами отложений, вмещающих пласт льда	Внутри отложений, вмещающих пласт льда
2	Генезис воды, "питающей" пласт льда	Озерные воды или воды подозерного талика	Поровые, связанные или капиллярные воды морского генезиса
3	Минерализация и химический состав воды	$M - 20-120 \text{ мг/л};$ $\text{HCO}_3 \geq \text{Cl} \geq \text{SO}_4,$ $\text{Ca} \geq \text{Na} + \text{K} \geq \text{Mg}$	$M - 1000-15\,000 \text{ мг/л};$ $\text{Cl} \geq \text{HCO}_3 \geq \text{SO}_4,$ $\text{Na} + \text{K} \geq \text{Ca} \geq \text{Mg}$
4	Условия и место формирования криогенного давления	Промерзание воды в замкнутой озерной котловине	Промерзание воды в замкнутом талике – в пачке мерзлого песка
5	Время формирования пласта льда	Значительно позднее промерзания вмещающих отложений	Одновременно с промерзанием вмещающих отложений

пласты ультрапресного инъекционного льда формироваться не могли.

Тем не менее автор считает инъекционное льдообразование ведущим процессом, формирующим мощные слоистые пласты ультрапресного льда в мерзлых засоленных морских отложениях. Инъекционное льдообразование происходило при следующих условиях: 1) пласты льда "питались" озерными водами, гидрохимическое родство которых убедительно доказано; 2) доставка воды к пласту льда осуществлялась под мощным криогенным давлением, которое возникало в результате промерзания воды в замкнутой озерной котловине или (реже) при замерзании воды в замкнутых подозерных таликах. Четкая слоистость пласта льда указывает на повторные (многократные) инъекции озерных вод.

Таким образом, в настоящее время существует две принципиально разные точки зрения на условия формирования ультрапресных пластов льда в процессе инъекционного льдообразования в толще морских засоленных отложений (см. таблицу).

**ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ МОРСКОЙ РАВНИНЫ И ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТА ЛЬДА**

**I этап.** *Регрессия моря, осушение поверхности равнины, начало многолетнего промерзания отложений.* Морские отложения, как известно, начинали охлаждаться и промерзать уже в процессе регрессии моря. После регрессии моря отложения активно и равномерно промерзли с осушенной поверхности равнины (рис. 3, I).

**II этап.** *Формирование термокарстовых озер и подозерных таликов,* видимо, начиналось в эпоху

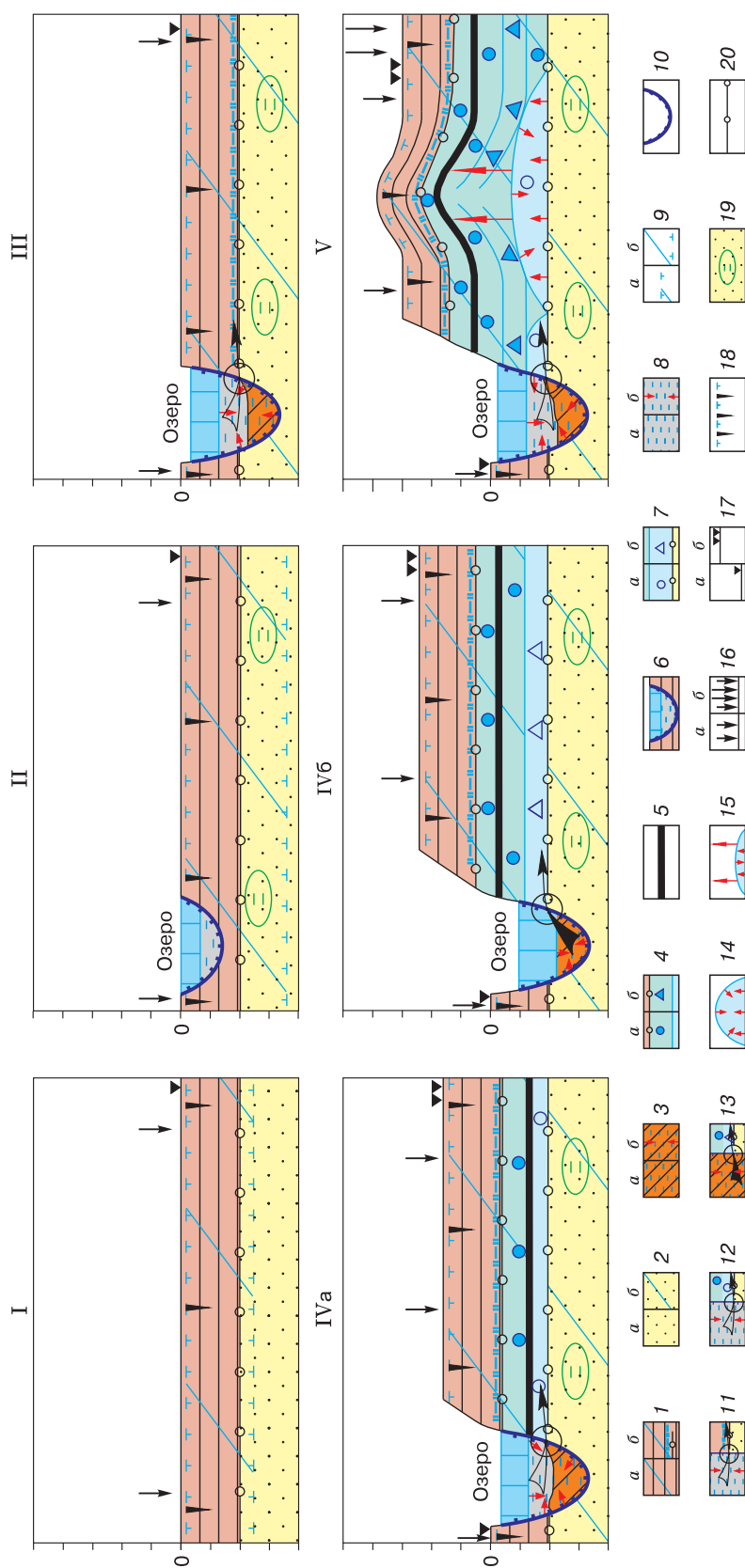
потепления климата. Этого потепления оказалось недостаточно для деградации криогенной толщи с поверхности, но вполне достаточно для зарождения термокарстового процесса и образования озер и подозерных таликов. На этом этапе в пачке мерзлых песков обособлялись линзы песков с криопэгмами (см. рис. 3, II). Реликтовые озера сохранились на морских равнинах до настоящего времени в виде огромных хасыреев.

**III этап.** *Проникновение озерной воды в толщу мерзлых отложений* становилось возможным лишь тогда, когда абсолютные отметки дна промерзающего озера опускались ниже абсолютных отметок зоны контакта пачки глин и пачки песка в бортах термокарстовой котловины (см. рис. 3, III). Формирование на озере сплошного ледового покрова приводило к образованию в озерной котловине замкнутой системы. Промерзающая в замкнутой котловине озерная вода приобретала огромное криогенное давление, под воздействием которого через зону контакта по криогенному водоупору она проникала в толщу мерзлых отложений. Водоупором служила кровля пачки мерзлых песков<sup>10</sup>.

**IV этап.** *Послойное наращивание мощности пласта льда снизу.* Если толщина озерного льда была меньше глубины озера, то из замкнутой озерной котловины под мощным криогенным давлением к подошве пласта льда поступала прозрачная озерная вода (см. рис. 3, IVa), а если больше, то поступала мутная вода или разжиженные осадки из водоносных таберальных отложений подозерного талика (см. рис. 3, IVб). В первом случае при замерзании слоя воды формировался слой стекловидного льда, во втором – слой льда, обогащенный минеральными включениями, или ледогрунт<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Если бы пески были немерзлыми, то вода под напором фильтровалась бы в пачку песков, а она проникала и деформировала приподошвенный слой пачки мерзлых засоленных глин. В этом слое формировалась крупносетчатая текстура, в которой вертикальные шпильки ультрапресного льда были значительно толще горизонтальных (см. рис. 3, III).

<sup>11</sup> Четкие параллельные границы отдельных слоев льда указывают на многократные (видимо, сезонные) инъекции воды, при этом каждая последующая инъекция внедрялась лишь после полного замерзания слоя воды, образованного предыдущей инъекцией.



**Рис. 3. Этапы развития морской равнины и формирования пласта льда.**

I – регрессия моря, осушение поверхности равнины, начало многолетнего промерзания озер и подозерных таликов; II – формирование термокарстовых озер и подозерных таликов; III – проникновение озерной воды в толщу мерзлых отложений; IVa – формирование слоя стекловидного льда, IVb – формирование слоя льда, обогащенного минеральными включениями; V – формирование подземного гидроакколита. 1 – глина засоленная; а – мерзлая, б – мерзлая, раздробленная, сильнольдистая с толстыми вертикальными шпирами; 2 – песок засоленный; а – немерзлый, б – мерзлый; 3 – таберальные водоносные образования; а – немерзлые, б – внутри замкнутого промерзающего талика с возрастающим криогенным давлением; 4 – слой пласта льда; а – стекловидный, б – непрозрачный с минеральными включениями; 5 – слой ледогрунта; 6 – озерный лед; 7 – слои воды; а – прозрачная из озера, б – мутная из подозерного талика; 8 – озерная вода; а – безнапорная, б – промерзающая с возрастающим криогенным напором; 9 – криогенная толща; а – кровля, б – подошва; 10 – граница подозерного талика; 11–13 – зоны внедрения воды в толщу мерзлых отложений; 11 – озерной воды вдоль контакта пачки мерзлого песка и пачки мерзлой глины (III), 12, 13 – вдоль контакта кровли пачки мерзлого песка и подошвы пласта льда; 12 – озерной воды (IVa, V), 13 – воды или разжиженных суспензий из талика (IVb); 14 – слой воды, промерзающий в замкнутой системе с возрастающим криогенным давлением; 15 – криогенное давление, деформирующее пласт льда и пачку глины; 16 – охлаждение пород мерзлой толщи с поверхности; а – равнономерное, б – неравномерное; 17 – абсолютная высота поверхности морской равнины; а – после регрессии моря, б – после формирования пластов льда; 18 – полигонально-клиновидные льды; 19 – линзы песка с криопегами; 20 – литологическая граница.

Наличие в отдельных слоях пласта песка, гравия, гальки и водорослей, а также слоев ледогрунта свидетельствует о том, что вода, поступающая из озера или подозерного талика, не фильтровалась через песчаные слои. Поток воды по кровле криогенного водоупора под напором проникал вдоль подошвы пласта на различные (иногда значительные) расстояния. Только при таком допущении песок, гравий, галька и водоросли могли оказаться внутри отдельных слоев льда. В условиях низкой температуры пород мерзлой толщи тонкий слой воды промерзал быстро и равномерно на всей площади пласта [Фотиев, 2009]. Объем слоя воды при замерзании увеличивался на 9 %, что обеспечивало равномерное площадное пучение мерзлой толщи без нарушения горизонтального залегания отдельных слоев. В результате площадного пучения пласт льда и пачка глин приподнимались на высоту, равную мощности вновь образованного слоя льда. На такую же высоту приподнималась и поверхность морской равнины.

Послойное наращивание мощности пласта льда снизу продолжалось до тех пор, пока в природе сохранялись по крайней мере три условия. Первое – объем воды в озере обеспечивал непрерывное формирование многочисленных слоев льда на всей площади формирующегося пласта. Второе – абсолютная отметка дна промерзающего озера (а иногда и подозерного талика) всегда была ниже абсолютной отметки зоны контакта пачки глин и пачки песка в бортах озерной котловины. Третье условие – равномерное охлаждение с поверхности пород мерзлой толщи. Это обеспечивало равномерное по глубине и скорости промерзание слоя воды на поверхности криогенного водоупора и формирование очередного слоя льда одинаковой толщины на всей площади пласта. Только при соблюдении этих условий на морских равнинах могли сформироваться горизонтально-слоистые пласты льда мощностью до 30–40 м, протяженность которых измерялась сотнями метров.

В связи с формированием мощных, значительных по площади пластов льда абсолютная отметка поверхности морской равнины на отдельных участках приподнималась на 30–40 м<sup>12</sup>.

**V этап.** Формирование крупных подземных гидролакколитов, видимо, совпадало с последней стадией формирования пластов льда. Глубина и скорость охлаждения с поверхности пород мерзлой толщи уже не могли быть одинаковыми. Основная причина этого – неравномерное распределение по площади толщины снежного покрова, обусловленное значительным эрозионным расчленением некогда горизонтальной поверхности равнины и очаговым распространением растительно-

го покрова. Неравномерное промерзание очередного слоя воды при сохранении условий доставки воды к подошве пласта льда неизбежно приводило к образованию замкнутых систем с промерзающей водой. При промерзании в них воды возникало огромное криогенное давление, под действием которого пласт льда и слои в пачке глин дугообразно изгибались и формировался подземный гидролакколит, размеры которого определялись объемом промерзающей воды (см. рис. 3, V).

Современным аналогом этого криогенного процесса могут служить крупные гидролакколиты, образующиеся в днищах речных долин в результате неравномерного промерзания подруслового потока речных вод в аллювиальных отложениях подруслового талика.

## ВЫВОДЫ

На основе анализа результатов исследований геокриологов, более 40 лет изучающих пластовые льды и вмещающие их мерзлые морские засоленные отложения на п-ове Ямал, автор пришел к следующим выводам.

- Озерные воды – единственный источник, способный обеспечить регулярное поступление огромных (несколько миллионов кубометров) объемов ультрапресной воды в толщу мерзлых засоленных морских отложений и формирование мощных, выдержанных по простиранию пластов льда и огромных подземных гидролакколитов. Вывод подтверждается гидрохимическим родством льда и воды в термокарстовых озерах.

- Доказано формирование пластов льда в субэаральных условиях после полной регрессии моря и значительно позднее – многолетнего промерзания отложений, вмещающих пласт льда. Основанием для вывода послужило гидрохимическое родство льда и воды в термокарстовых озерах, для формирования которых, как известно, требуется продолжительный отрезок времени после полной регрессии моря.

- Морские воды не могли участвовать в формировании пластов льда. Вывод подтверждается не только генетическим различием минерализации и химического состава инъекционного льда и морской воды, но и формированием пласта льда в субэаральных условиях значительно позднее полной регрессии моря.

- Проанализированы наиболее вероятные условия формирования пластов льда в процессе сегрегационного и инъекционного льдообразования и показано, насколько существенно они различаются по: 1) генезису воды, участвующей в формировании пласта льда, 2) местоположению источ-

<sup>12</sup> Этот факт до настоящего времени не учитывается при реконструкции палеорельефа полуострова Ямал в четвертичное время.

ника воды (внутри или за пределами отложений, вмещающих пласт льда), 3) механизму доставки воды от источника к пласту льда (безнапорная миграция или напорная флюация).

- Доказано, что мощные (до 30–40 м), выдержанные по простиранию пласты льда не могли сформироваться в процессе сегрегационного льдообразования и тем более сингенетически, одновременно с многолетним промерзанием вмещающих их отложений.

- Показана ведущая роль процесса инъекционного льдообразования в формировании мощных (до 30–40 м), выдержанных по простиранию пластов ультрапресного льда внутри мерзлых засоленных отложений: 1) мощные слоистые пласты льда формировались в результате повторного (многократного) внедрения ультрапресных озерных вод в толщу мерзлых отложений; 2) внедрение озерной воды, ее доставка от озера к пласту льда и продвижение на значительное расстояние вдоль подошвы пласта по кровле криогенного водоупора происходило под огромным криогенным давлением, возникающим в замкнутой термокарстовой котловине при промерзании озерной воды.

- Ледяное тело, имеющее форму пласта и сформировавшееся в результате повторной (многократной) инъекции озерной воды в толщу мерзлых отложений, предлагается называть **повторно-инъекционным пластом льда (ПИПЛ)**.

- Рассмотрено пять этапов развития морской равнины на участках формирования пластов льда: I этап – регрессия моря, осушение поверхности равнины, начало многолетнего промерзания отложений; II этап – формирование термокарстовых озер и подозерных таликов; III этап – проникновение озерной воды в толщу мерзлых отложений; IV этап – послойное наращивание мощности пласта льда снизу; V этап – формирование подземных гидролакколитов.

## Литература

- Анисимова Н.П.** Криогидрохимические особенности мерзлой зоны / Н.П. Анисимова. Новосибирск, Наука, 1981, 153 с.
- Баулин В.В.** Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности / В.В. Баулин, Е.Б. Белопухова, Г.И. Дубиков, Л.М. Шмелев. М., Наука, 1967, 214 с.
- Баулин В.В.** Многолетнемерзлые породы нефтегазоносных районов СССР / В.В. Баулин. М., Наука, 1985, 176 с.
- Баулин В.В., Дубиков Г.И.** Пластовые залежи подземного льда // Тр. ПНИИИС, 1970, т. II, с. 175–193.
- Васильчук Ю.К.** Пластовые ледяные залежи в пределах Бованенковского ГКМ (Центральный Ямал) // Инж. геология, 2010, № 3, с. 50–67.
- Васильчук Ю.К.** Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов / Ю.К. Васильчук. М., Изд-во Моск. ун-та, 2012, т. 1, ч. 2, 472 с.
- Втюрин Б.И.** Подземные льды СССР / Б.И. Втюрин. М., Наука, 1985, 214 с.
- Геологический словарь.** М., Изд-во ГНТИ, 1955, т. II, 446 с.
- Дубиков Г.И.** Парагенез пластовых льдов и мерзлых пород Западной Сибири // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 24–42.
- Дубиков Г.И.** Геохимические исследования пластовых льдов и мерзлых пород (по работам на озере Ней-то) // Вопросы региональной и инженерной геокриологии. М., Стройиздат, 1983, с. 52–73.
- Дубиков Г.И.** Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири / Г.И. Дубиков. М., ГЕОС, 2002, 246 с.
- Дубиков Г.И., Корейша М.М.** Ископаемые – инъекционные льды на полуострове Ямал // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1964, № 5, с. 58–65.
- Дуров С.А.** Синтез в гидрохимии // Происхождение солевого состава природных вод. 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.
- Корейша М.М., Хименков А.Н., Брыксина Г.С.** Пластовые комплексы подземных льдов в районе озера Нейто (п-ов Ямал) // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 42–51.
- Крицук Л.Н.** Подземные льды Западной Сибири / Л.Н. Крицук. М., Науч. мир, 2010, 352 с.
- 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.
- Слагода Е.А., Опокина О.Л., Рогов В.В., Курчатова А.Н.** Строение и генезис подземных льдов в верхнеплейстоценовых отложениях мыса Марре-Сале (Западный Ямал) // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 2, с. 9–22.
- Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А., Бурков А.В.** Особенности состава пластовых льдов и вмещающих их четвертичных отложений в районе Марре-Сале, Западный Ямал // Материалы Третьей конф. геокриологов России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, т. 3, с. 251–259.
- Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А.** Пластовые льды в дислоцированных четвертичных отложениях Западного Ямала // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 2, с. 68–78.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О.** Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэггов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли, 2002, т. VI, № 3, с. 15–24.
- Фотиев С.М.** Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 40–65.
- Фотиев С.М.** Генезис пластов льда в морских отложениях Ямала // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 63–75.
- Фотиев С.М.** Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты) / С.М. Фотиев. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2009, 280 с.
- 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.
- Фотиев С.М.** Залежи пластового льда в районе полярной станции Марре-Сале (западное побережье полуострова Ямал) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 34–46.

Поступила в редакцию  
3 июня 2014 г.