

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345; 557.79

DOI: 10.15372/KZ20210401

## КРИОСТРАТИГРАФИЯ И КРИОФАЦИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В.Е. Тумской

*Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН,  
677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия; vtumskoy@gmail.com*

Рассмотрена актуальная теоретическая проблема расчленения толщ мерзлых четвертичных образований для целей реконструкции истории их развития, стратиграфии и картирования. Для этого обобщено использование криофациального и криоформационного методов. Криостратиграфия рассматривается как новое научное направление на стыке криолитологии и климатостратиграфии. Определены понятия “криофация”, “криогенный контакт”, “криогенная формация”, выделены характерные типы криогенного строения криофаций и криогенных контактов. Предложена последовательность криолито-логических исследований от первичного расчленения мерзлых толщ до решения криостратиграфических задач. Показано соотношение криостратиграфии и палеокриостратиграфии.

**Ключевые слова:** криостратиграфия, климатостратиграфия, криофация, криогенное строение, криогенный контакт, криогенная формация.

## CRYOLITHOSTRATIGRAPHY AND CRYOFACIES ANALYSIS

V.E. Tumskoy

*Melnikov Permafrost Institute, SB RAS,  
Merzlotnaya str. 36, Yakutsk, 677010, Russia; vtumskoy@gmail.com*

The present article discusses the current theoretical problem of the dissection of thicknesses of frozen Quaternary formations for the purpose of reconstructing the history of their development, stratigraphy and mapping. This justifies the utilization of the cryofacies and cryoformation methods. Cryolithostratigraphy is discussed as a new branch of science at the junction of cryolithology and climatostratigraphy. The concepts of “cryofacies”, “cryogenic contact”, “cryogenic formation” are defined; distinctive types of cryofacies cryostratigraphy and cryogenic contacts are highlighted. A range of cryolithological studies from the primary dissection of frozen thicknesses to the solution of cryolithostratigraphic problems is proposed. The relationship between cryolithostratigraphy and paleocryolithostratigraphy is revealed.

**Key words:** cryolithostratigraphy, climatostratigraphy, cryofacies, cryostratigraphy, cryogenic contact, cryogenic formation.

## ВВЕДЕНИЕ

Основная задача четвертичной геологии – это “...расчленение четвертичного покрова по возрасту и способам его образования, и на этой основе – реконструкция палеогеографических условий, геологических процессов и минерогенеза” [Астахов, 2008, с. 10]. Стратиграфическое расчленение четвертичных отложений основано на климатостратиграфическом подходе [Стратиграфический кодекс..., 2019]: во время геологических эпох с относительно стабильными климатическими условиями формируются определенные парагенетические сочетания рыхлых отложений. В зависимости от того, являются климатические условия более теплыми или более холодными, меняется и набор генетических типов отложений, особенности их состава, строения и условий залегания. Одновременно происходящие изменения в составе флоры

и фауны, изотопном составе атмосферных осадков и другие могут в той или иной степени отражаться в составе четвертичных образований и служить дополнительными источниками палеогеографической информации. Существующая схема периодизации четвертичных образований, созданная для ледниковых районов, основана на чередовании климатических эпох, приводивших к разрастанию и сокращению наземных ледников, и соответствующим им отложениям ледникового ряда и межледниковых образований [Зубаков, 1986; French, 2007]. Периодизация четвертичного периода для приморских районов арктической зоны [Сакс, 1948; и др.] и, например, Каспийского моря [Зубаков, 1986; и др.] в большей степени основана на чередовании морских и субаэральных условий их развития. Поэтому местные и региональные стра-

тиграфические схемы четвертичных отложений имеют свою специфику, несмотря на то, что периодизация событий в них в целом отражает динамику глобальных климатических условий.

В настоящей статье рассматривается проблема расчленения четвертичных отложений в пределах криолитозоны. Многие особенности залегания и взаимоотношения мерзлых отложений могут быть правильно истолкованы только при использовании достижений криолитологии. При промерзании отложений происходит значительное изменение особенностей их строения в процессе сегрегационного льдовыделения, часто появляются новые геологические образования – залежеобразующие подземные льды. Протаивание мерзлых отложений обычно сопровождается нарушением первичной седиментационной слоистости, изменением состава отложений и т. д. Незнание или непонимание геологических результатов как криогенеза отложений в целом, так и собственно криолитогенеза часто приводило и приводит к ошибочным представлениям о происхождении, природных условиях накопления и последующего преобразования мерзлых толщ. Эти ошибки находят свое отражение в составленных геологических картах, стратиграфических схемах, палеогеографических реконструкциях и т. д. В настоящее время применение криолитологического подхода к расчленению мерзлых четвертичных образований привело к обособлению научного направления на стыке геологии четвертичных образований, геокриологии и палеоклиматологии – криостратиграфии.

### РАСЧЛЕНЕНИЕ ТОЛЩ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ВЫДЕЛЕНИЕ КРИОФАЦИЙ

Основным геологическим методом изучения мерзлых горных пород считается метод мерзлотно-фациального анализа [Катасонов, 1972, 1973; Еришов, 1982; Попов и др., 1985; Бадю, 2010]. Его основы были впервые сформулированы в диссертации Е.М. Катасонова в 1954 г., в которой он называл его методом геокриологических фаций, однако в полном объеме эта работа была издана только в 2009 г. [Катасонов, 2009]. Позднее этот метод был назван криофациальным анализом [Каплина, 1988]. “Мерзлотно-фациальный анализ – основной, наиболее общий метод криолитологии. Сущность его – в расчленении мерзлых толщ. В разрезах выделяются и всесторонне исследуются отличающиеся составом, льдистостью и строением генетические разновидности, фации отложений, которые формировались в неодинаковых мерзлотно-ландшафтных условиях или промерзали на разных стадиях раннего диагенеза” [Катасонов, 1972, с. 29]. Такие фации Е.М. Катасонов называл *геокриологическими фациями*, понимая под ними

отложения, которые характеризуются двумя группами генетических признаков: вещественно-седиментационными, с одной стороны, и криогенными (льдистостью, криогенным строением и строением самих ледяных включений) – с другой [Катасонов, 2009]. Позднее они были названы *криофациями* [Жесткова, 1982; Каплина, 1988]. Т.Н. Каплина не дает прямого определения понятия “криофация”, однако под ним подразумевается геологическое тело с определенным криогенным строением. Очень близким по смыслу, но с инженерно-геологическим уклоном, является понятие “криолитогенная фация”, под которой понимается “монопородное геологическое тело, чье криогенное строение (включая физические свойства) обусловлено единым процессом седиментации и криодиagenеза” [Усов, 2015, с. 19].

Таким образом, использование криофациального анализа для расчленения мерзлых пород основано на особенностях *криогенного строения* мерзлых пород, под которым подразумевается совокупность текстурных и структурных признаков породы, обусловленных их криогенным преобразованием и льдовыделением до, во время и после процесса их промерзания [Жесткова, 1982]. При этом криогенное строение определяется всеми типами подземных льдов, как текстурообразующими, так и залежеобразующими. Результатом применения криофациального анализа является выделение криофаций в разрезе мерзлых толщ.

Вопросам фациального анализа геологической среды посвящено большое количество работ [Шанцер, 1966; Крашенинников, 1971; Шванов, 1982; Вылцан, 2002; Цейслер, 2002]. В настоящее время понятие “фация” используется как дуалистическое: с одной стороны, это совокупность локальных природных условий (фациальных условий), в которых происходит осадконакопление, а с другой – это определенное геологическое тело, образовавшееся в данных условиях и имеющее характерные признаки образования (фациальные признаки) [Геологический словарь, 2012]. Выделение фаций может производиться на основе разных критериев, не только физико-географических или седиментологических (вспомним, например, сейсмофации). Выделение криофаций вполне соответствует принципам выделения фаций в геологии, критерием при этом служит криогенное строение отложений.

С точки зрения автора, выделять криофации можно исходя из разных соображений. С одной стороны, учитывая, что промерзание является вторичным процессом (“мерзлотно-диагенезом”) по отношению к осадконакоплению, даже для синкриогенных отложений, можно выделять криофации на основании геолого-седиментационных признаков и после этого характеризовать их криогенное строение (по этому пути пошли, например,

в работе [Мельников и др., 2015]). В этом случае границы между криофациями будут определяться в основном изменением состава отложений, условиями залегания, характером слоистости и т. д. С другой стороны, можно выделять криофации на основании именно криогенного строения, и тогда к ним могут относиться отложения, различающиеся, например, по составу и влажности.

Чтобы придать этому понятию более криолитологический смысл, автор рассматривает **криофацию как часть толщи многолетнемерзлых пород, криогенное строение которой формировалось при относительно неизменных условиях промерзания и характеризуется однородностью или закономерным изменением в пространстве**. Таким образом, совокупность особенностей строения мерзлых пород за счет текстурных и залежеобразующих льдов является основным определяющим признаком, по которому криофации отличаются друг от друга. Условия промерзания как совокупность направления промерзания отложений, их температурного режима, состава и свойств отложений, набора криогенных геологических процессов представляют собой криофациальные условия.

В качестве самостоятельных криофаций могут рассматриваться тела залежеобразующих льдов. Если текстурообразующие сегрегационные льды рассматриваются как минерал, то залежеобразующие льды относятся к разновидности мерзлой горной породы [Ершов, 1982]. Их можно рассматривать как часть мерзлой толщи, состоящую из ледяной породы с относительно однородным строением (криолит). Применительно к ним понятия “криогенная текстура” и “криогенная структура” приобретают иной смысл, превращаясь в понятия “текстура и структура льда”. В зависимости от задач исследований в качестве самостоятельных криофаций можно рассматривать любые залежеобразующие подземные льды, однако наиболее целесообразно это для отдельных залежей погребенных, пещерных и инъекционных типов льдов. Повторно-жильные льды, формируя пространственную решетку во вмещающих отложениях, при решении большинства криолитологических или криостратиграфических задач должны рассматриваться как элемент их криогенного строения.

Наиболее четко криофации выделяются в толще дисперсных отложений со шлировым льдовыделением, так как ледяные шлиры, формируя криогенные текстуры, лучше всего подчеркивают и проявляют направление и особенности промерзания. Предложенное выше определение криофации позволяет выделять их во всех типах мерзлых толщ, а не только в пределах толщ криолитогенных отложений, под которыми подразумеваются отложения, накапливавшиеся в условиях уже су-

ществующих многолетнемерзлых пород [Катасонов, 1973, 2009]. Это расширяет возможности использования криофациального анализа, хотя результаты его использования применительно к различным по криогенному генезису мерзлым толщам могут быть разными.

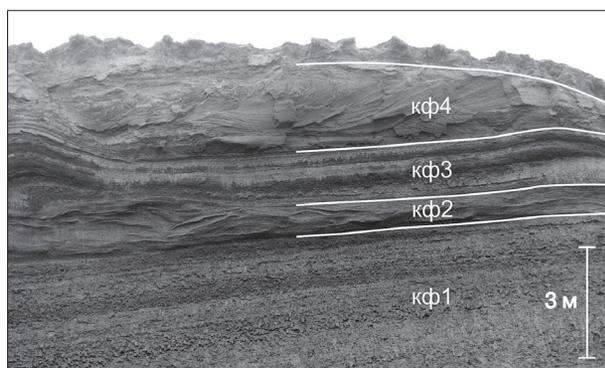
### ТИПЫ КРИОГЕННОГО СТРОЕНИЯ КРИОФАЦИЙ И КРИОГЕННЫЕ КОНТАКТЫ

Выделение криофаций является одним из результатов изучения криогенного строения мерзлых толщ. Определяющим атрибутом каждой криофации при этом является тип криогенного строения мерзлых пород в пределах каждой из них. Для разграничения (обособления) одной криофации от другой и установления последовательности их образования определяющее значение имеет характер границ между ними.

С точки зрения времени возникновения криогенного строения выделено **два типа мерзлых толщ: с первичным и вторичным криогенным строением** (ПКС и ВКС соответственно). К мерзлым толщам с ПКС относятся толщи, криогенное строение которых образовалось при промерзании формирующегося или изначально немерзлого массива пород либо массива, испытавшего длительное региональное глубокое протаивание во время предшествующего термохрона. Апеллируя к типам криолитогеоза, рассмотренным в работе Н.Н. Романовского [1993], к толщам с ПКС относятся толщи субаэральной и субгляциальной групп синкриогенного ряда пород, отложения мелководных водоемов субаквальной группы и изначально немерзлых собственно субаквальных отложений, толщи эпикриогенных дисперсных отложений, промерзших синхронно и асинхронно. К мерзлым толщам с ВКС относятся толщи, криогенное строение которых связано с промерзанием таликов, границы которых влияют на конфигурацию фронта промерзания и температурное поле промерзающих пород, характер льдовыделения и пр. К ним относятся мерзлые породы, образовавшиеся при эпикриогенном промерзании талых пород в таликах, парасинкриогенные и квазисинкриогенные мерзлые породы, а также часть синхронно эпикриогенных мерзлых пород.

Первичное криогенное строение в пределах криофаций может либо быть относительно однородным, либо закономерно изменяться в пространстве. Последнее обычно связано с изменением состава отложений, влажности и температурного градиента с глубиной при относительно неизменных условиях промерзания на поверхности. На данном этапе изученности автор выделяет четыре типа криогенного строения мерзлых толщ с ПКС, образующихся в процессе одного этапа промерзания: **однородное, направленное, цикли-**

**ческое и хаотичное** (рис. 1). **Однородное криогенное строение** характеризуется одинаковыми параметрами криогенных текстур и залежеобразующих льдов (примерно одинаковой толщиной ледяных шлиров, расстоянием между ними или размерами ячеек текстуры, параметрами решетки ледяных жил и т. д.). **Направленное криогенное строение** характеризуется закономерным изменением криогенного строения мерзлой толщи в одном или нескольких направлениях, например, постепенным увеличением расстояния между ледяными шлирами или ростом их толщины (например, классическое криогенное строение эпигенетически промерзшей толщи дисперсных отложений), закономерным уменьшением ширины ледяных жил и т. д. **Циклическое криогенное строение** характеризуется периодическим повторением по разрезу основных черт рисунка криогенной текстуры. Классический пример – горизонты синкриогенных толщ с поясковыми криогенными текстурами. Вышеописанные типы криогенного строения мерзлых толщ выделяются по геометрическим характеристикам криогенных текстур или залежеобразующих льдов и могут быть дополнены при необходимости. **Хаотичное криогенное строение** характеризуется незакономерным изменением криогенного строения мерзлой породы в пределах криофации, которое само по себе и является отличительной чертой этой мерзлой толщи. Причиной наличия такого строения может быть сложное распределение в пространстве состава и свойств отложений (влажности, содержания органического вещества и др.) и подземных льдов. Каждый из указанных типов может характеризоваться дополнительным определением, более точно отражающим характер криогенного строения (см. рис. 1).



**Рис. 1. Пример некоторых типов криогенного строения (КС) криофаций в разрезе:**

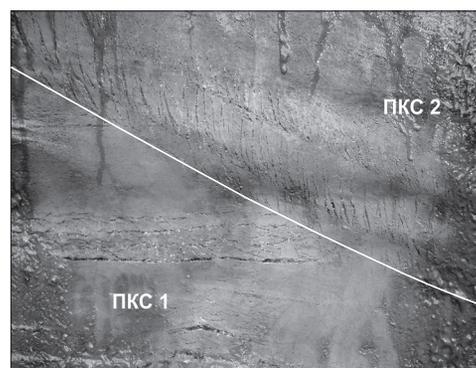
кф1 – однородное (однородное сетчатое КС), кф2 – хаотичное (хаотичное наклонно-линзовидное КС), кф3 – циклическое (параллельно-циклическое КС), кф4 – хаотичное (хаотичное наклонно-слоистое КС).

Типы криогенного строения мерзлых пород с ВКС выделяются такие же, как и для мерзлых пород с ПКС, за исключением циклического криогенного строения. Отличие будет заключаться в иной геометрии криогенных текстур и распределении льдистости из-за более сложной конфигурации фронта (или фронтов) промерзания.

Конечно, при описании криогенного строения необходимо помнить о масштабном эффекте: в зависимости от размера документируемой части разреза мерзлых пород описание криогенного строения может различаться. При выделении криофаций их характерный размер по горизонтали и по разрезу обычно составляет от нескольких десятков сантиметров до сотен метров.

В процессе синкриолитогенеза, а также при эпикриогенном промерзании немерзлой или длительной талой толщи пород ее первичное криогенное строение будет меняться по горизонтали в зависимости от ландшафтных условий на поверхности, состава и влажности отложений, развивающихся экзогенных геологических (в том числе криогенных) процессов и т. д. В результате криогенное строение даже в одновременно промерзших породах будет различаться. При этом криогенное строение формирующихся криофаций может изменяться по горизонтали постепенно или резко. В результате такого промерзания криогенное строение по разрезу также будет различаться, причем наибольшая изменчивость будет свойственна синкриогенным толщам пород и приповерхностным горизонтам эпикриогенных толщ.

В дальнейшем мерзлая толща с ПКС может изменяться несколькими путями. Толща может сохраниться в разрезе, подвергнуться полному или частичному уничтожению в результате эрозии, полностью или частично протаять. Если мерз-



**Рис. 2. Пример эрозионно-криогенного контакта (белая линия) двух мерзлых толщ.**

Толща с ПКС 2, заполняющая термоэрозионный врез, вложена в мерзлую толщу с ПКС 1.

лая толща полностью эродирована (уничтожается), то ее криогенное строение исчезает, органическая составляющая породы переотлагается и включается в новые толщи пород. Если мерзлая толща эродирована частично (например, при образовании термоэрозионных оврагов или в результате действия комплекса склоновых процессов), а образовавшиеся понижения заполняются отложениями, которые промерзают в новых условиях, то они представляют собой новую мерзлую толщу со своим криогенным строением. Ее седиментационное и криогенное строение вблизи контакта с окружающими отложениями зависит в той или иной мере от конфигурации эрозионного вреза и свойств непротаявшей части массива (ее состава, температуры и т. д.), но так как при этом будут промерзать вновь сформировавшиеся отложения, она также будет иметь первичное криогенное строение (рис. 2).

Если мерзлая толща протаивает, то формируются таберированные и (или) таберальные образования [Демидюк и др., 1963; Романовский, 1993]. Первые образуются при протаивании мелкозернистых отложений, поэтому они в основном сохраняют свое первичное седиментационное строение, незначительно проседая и изменяясь преимущественно геохимически. Таберальные же образования формируются при протаивании мелкозернистых отложений, поэтому их органическая составляющая переотлагается на месте или частично выносится с полным или почти полным нарушением первичного седиментационного строения. Граница между этими типами образований по льдистости достаточно условна, так как сохранение или утрата седиментационного строения зависит от состава и льдистости отложений. При повторном промерзании таберальные и таберированные образования приобретают ВКС, которое определяется не только новыми условиями промерзания (температурой, влажностью пород и др.), но и геометрией сохранившейся непротаявшей части исходной подстилающей или вмещающей мерзлой толщи с ПКС.

Если мерзлая толща с ПКС протаивает полностью, а затем опять промерзает, то во многих случаях у нас нет возможности определить, является ли наблюдаемое криогенное строение толщи первичным или вторичным. В некоторых случаях, например для морских и озерных отложений, помогают в интерпретации разрезов палеокриогенные образования, такие как посткриогенные текстуры или псевдоморфозы. Учитывая цикличность разного масштаба в развитии многолетнемерзлых толщ, такая проблема может вставать довольно часто, однако для ее решения требуется привлечение дополнительных геологических данных.

Исходя из вышесказанного очевидно, что характер границ между криофациями с разным

криогенным строением имеет большое значение для выяснения взаимоотношений между ними. Поэтому, как и при обычном геологическом фациальном анализе, им надо уделять особое внимание. Перед их рассмотрением необходимо уточнить, что целесообразно использовать два понятия – криогенная граница и криогенный контакт.

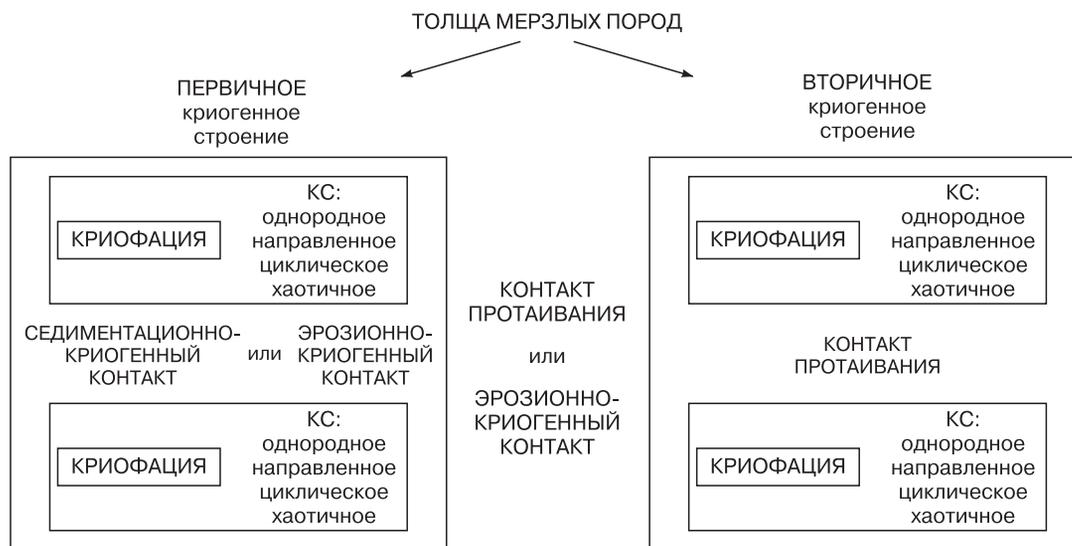
**Криогенной границей** автор называет поверхность раздела между толщами пород, имеющих разное криогенное состояние (например, между мерзлыми и тальми, мерзлыми и охлажденными, охлажденными и тальми толщами и т. д.).

**Криогенным контактом** называется поверхность раздела между толщами мерзлых пород, имеющих различное криогенное строение, т. е. между криофациями. В настоящее время автор выделяет три типа криогенных контактов: седиментационно-криогенные, эрозионно-криогенные и контакты протаивания.

**Седиментационно-криогенные контакты (СКК)** формируются в результате изменения фациальных условий осадконакопления (когда меняется состав и (или) свойства отложений) или криофациальных условий промерзания в процессе синкриолитогеоза, а также при эпигенетическом промерзании толщ с разным составом отложений. Они разделяют криофации, имеющие первичный тип криогенного строения. СКК могут существовать в синкриогенных отложениях, разделять эпи- и синкриогенные толщи, присутствовать в эпикриогенных, парасинкриогенных и диакриогенных толщах. По характеру проявления можно говорить о *постепенных* и *резких* СКК, в зависимости от того, насколько “растянут” в пространстве переход от одного типа криогенного строения к другому.

**Эрозионно-криогенные контакты (ЭКК)** связаны с частичным эрозионным размывом пород мерзлой толщи, когда образовавшаяся эрозионная форма заполняется новыми отложениями, промерзающими в иных условиях (см. рис. 2). При этом на контактах этого типа обычно хорошо выражены седиментационные изменения в строении отложений (меняется состав материала и особенно условия его залегания, тип слоистости и т. д.). Можно представить два случая: когда ЭКК разделяет криофации с ПКС и когда ЭКК разделяет криофации с ВКС и ПКС. Примером в первом случае могут являться контакты между разновозрастными позднеплейстоценовыми отложениями ледового комплекса [Тумской, 2004, 2012], во втором – контакты между таберальными образованиями аласных котловин и отложениями, заполняющими врезанные в них позднеголоценовые термоэрозионные овраги.

**Контакты протаивания (КП)** связаны с неполным протаиванием мерзлых пород, формированием таберальных и (или) таберированных об-



**Рис. 3. Возможные соотношения криофаций с различными типами криогенного строения и криогенных контактов.**

разований и их последующим промерзанием. Контакты протаивания разделяют подстилающие (вмещающие) мерзлые толщи с ПКС и таберированные или таберальные образования с ВКС. В зарубежной литературе они известны под названием “thaw unconformity” [Mackay, 1966; French, 2007].

На рис. 3 показаны возможные варианты соотношений между криофациями с разными типами криогенного строения и криогенных контактов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ КРИОФАЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Расчленение толщи мерзлых пород по криогенному строению и льдистости, т. е. выделение криофаций, является одним из основных результатов криолитологических исследований толщ мерзлых пород. Чаще всего они осуществляются для криолитогенных отложений. Криогенное строение последних во многом определяется, по мнению Е.М. Катасонова [2009], их геологическим генезисом. Поэтому Е.М. Катасонов полагал, что основным достоинством мерзлотно-фациального анализа является возможность использования криогенного строения криолитогенных отложений как дополнительного источника сведений о геологическом генезисе отложений [Катасонов, 1965, 1972, 2009], о чем также говорили и другие мерзлотоведы [Втюрин и др., 1957; Романовский, 1961]. Однако, как было показано почти сразу [Втюрин, Гасанов, 1962], криогенное строение мерзлых пород определяется температурным режимом при их промерзании, гранулометрическим составом, влажностью и другими параметрами.

Несмотря на зависимость этих параметров от фациальных условий формирования и промерзания отложений, они не являются “прямыми функциями” их геологического генезиса. Поэтому криогенное строение мерзлых отложений не позволяет однозначно устанавливать геологический генезис отложений, но помогает более обоснованно судить об особенностях промерзания пород.

По мнению автора, необходимо четко понимать, что результат фациальных и криофациальных исследований – разный. Фациальный анализ четвертичных отложений позволяет реконструировать особенности осадконакопления и ландшафтные условия в одно и то же геологическое время на соседних участках, определяя принадлежность отложений к конкретным фациальным условиям осадконакопления, генетическому ряду и (или) типу четвертичных отложений. Криофациальный анализ позволяет устанавливать условия промерзания пород и способ их промерзания. Под условиями промерзания для криолитогенных отложений при этом подразумеваются температурные условия на поверхности отложений и распределение температуры по разрезу в его верхней части, влажность отложений, конфигурация криогенных границ, во многих случаях – набор и характер протекания криогенных геологических процессов. Под способом промерзания (или типом криолитогеоза) понимается соотношение процессов осадконакопления и перехода осадков в многолетнемерзлое состояние во времени. Их можно различать по следующим критериям: по наличию или отсутствию процесса осадконакопления в процессе многолетнего промерзания; по соотношению геологического возраста отложений

и их криогенного возраста. По мнению автора, это не одно и то же, но в данном исследовании важно, что такой подход приводит к выделению двух основных типов мерзлых толщ – синкриогенных и эпикриогенных [Попов, 1953; Достовалов, Кудрявцев, 1967]. Эти способы формирования многолетнемерзлых пород в настоящее время рассматриваются как их криогенный (мерзлотный) генезис. При таком понимании геологический генезис отложений существенно отличается по смыслу от типов промерзания горных пород, в связи с чем Т.Н. Каплина [1986] предложила называть их *криогенетическими типами*. Принципиально важно то, что выделенные способы формирования мерзлых пород приводят к различному криогенному строению мерзлых толщ, в связи с чем решение обратной задачи (реконструкция условий и способа промерзания отложений) может быть относительно однозначным, в отличие от неоднозначности установления по криогенному строению пород их геологического генезиса.

По аналогии с классификацией генетических типов континентальных образований [Шанцер, 1966] синкриогенные и эпикриогенные толщи целесообразно рассматривать как криогенетические ряды мерзлых отложений. В каждом из них можно выделить несколько криогенных групп и типов толщ мерзлых отложений, различающихся по условиям формирования, степени диагенетического преобразования отложений перед промерзанием и криогенному строению. С точки зрения криолитологии особенно значимой является разработка классификации криогенетических групп и типов для криолитогенных отложений. По сути, такой подход положен в основу выделения групп и типов толщ мерзлых пород в работе Н.Н. Романовского [1993], однако он требует существенной доработки.

Исходя из вышеизложенных принципов выделения криогенетических типов мерзлых толщ, в настоящее время по генезису мерзлых толщ выделяются син- и эпикриогенные толщи, среди которых выделяются более дробные подразделения. Парасинкриогенные и диакриогенные мерзлые толщи пока рассматриваются как самостоятельный криогенетический ряд, но без дальнейшего подразделения. При этом для криолитогенных мерзлых толщ выделение подгрупп и типов будет происходить по одному принципу, а для эпикриогенных толщ – по другому. Однако в обоих случаях, во-первых, требуется разработка более обоснованной и детальной криогенетической классификации мерзлых толщ, а во-вторых, применение криофациального анализа получает четкую и вполне определенную цель – установление криогенетического типа мерзлых толщ, а при недостатке данных – группы или ряда. Их соотношение в пространстве позволяет реконструировать изме-

нения геокриологических условий по латерали и по разрезу во времени, определять последовательность промерзания выделенных фаций. Совместное решение задач фациального и криофациального анализов позволит реконструировать как условия накопления отложений, так и условия их промерзания. В результате мы приходим к следующему уровню использования результатов криолитологических исследований – криостратиграфии.

## КРИОСТРАТИГРАФИЯ

Как показано выше, использование криофациального анализа позволяет расчленить разрез мерзлой толщи на криофации, установить криогенетический тип каждой из них и характер криогенных контактов. Развивая такой подход дальше, **совокупность криофаций одного криогенетического ряда, образовавшихся во время одного периода промерзания, представляет собой криогенную формацию**. Соответственно, можно говорить об эпикриогенной и синкриогенной формациях, что в свое время предложила Т.Н. Каплина [1986]. Однако упоминаемые ею в этой работе две другие формации (палеокриогенная и сезоннокриогенная) выделены по совершенно другим признакам и вряд ли могут рассматриваться наравне с указанными. Криогенные формации рассматривались и на уровне групп [Алексеев, 2015], что, возможно, в дальнейшем будет реализовано для криолитогенных и синхронно-эпикриогенных мерзлых толщ. Установление географических и геологических условий формирования мерзлых пород на уровне криогенных формаций рассматривается как основная цель мерзлотно-формационного анализа, а изучение особенностей преобразования рыхлых образований на всех стадиях их эволюции – от элювия до осадочной породы – в рамках мерзлотно-стадиального анализа [Ершов, 1982]. Однако есть еще одно направление изучения мерзлых дисперсных отложений четвертичного возраста – *криостратиграфия*, т. е. использование криогенного строения мерзлых пород на мезо- и макроуровнях для целей стратиграфического расчленения разрезов и реконструкции истории формирования четвертичных отложений в криолитозоне.

Криогенное строение мерзлых пород, с учетом величины их льдистости, использовалось для расчленения разрезов уже в работах М.М. Ермолаева [1932], Б.И. Втюрина [Втюрин и др., 1957], А.И. Гусева [1958], Н.Н. Романовского [1961] и других исследователей. Присутствие подземных льдов учитывалось при обособлении верхнеплейстоценовых отложений и выделении их в самостоятельный стратиграфический горизонт, впоследствии названный едомной свитой [Васьковский, 1963]. О том, что особенности строения и

залегания подземных льдов могут быть использованы для разработки стратиграфических схем, писал А.И. Попов [1965]. Однако в этих и аналогичных работах для решения стратиграфических задач использовались только данные о повторно-жильных льдах. Позднее обращалось внимание на изменение криогенных текстур в разных горизонтах мерзлых толщ. Например, Т.Н. Каплиной [1981], С.В. Томирдиаро [1982] и другими отмечалось изменение криогенных текстур в отложениях едомного ледового комплекса со шлировых на микрошлировые и массивные, отражающее их промерзание в значительно более суровых климатических условиях. Кроме того, определенное стратиграфическое значение придавалось и включениям различных типов пластовых льдов [Иванов, Яшин, 1959; Баду и др., 1982].

Однако прямо о возможности и необходимости использования криогенного строения мерзлых толщ для решения стратиграфических задач было впервые сказано, насколько известно автору, в решениях Межведомственного стратиграфического совещания, прошедшего в Магадане в 1982 г. В обзоре изученности стратиграфии четвертичных отложений Т.Н. Каплиной было сказано, что на Яно-Колымской низменности "...были обнаружены циклические смены типов осадконакопления и преобразования отложений криогенными процессами, позволившие применять криолитологический метод для стратиграфического расчленения отложений ("криостратиграфия"). Хотя этот метод находится еще в начале своего становления, уже ясно, что он имеет большие перспективы и сопоставим по значению с исследованиями напластования морен в ледниковых районах" [Решения..., 1987, с. 34].

В дальнейшем, однако, данный метод в отечественной литературе не упоминался, хотя в работе Н.Н. Романовского [1993] говорится, что "различия в криогенном строении разновозрастных синкриогенных пород дают дополнительные возможности для палеоклиматических и палеогеокриологических реконструкций" (с. 151). Связано это, по-видимому, с неразработанностью понятийного аппарата криостратиграфии, методики применения криостратиграфии при проведении геологических исследований в криолитозоне, а также с недостаточной подготовкой геологов-четвертичников в области криолитологии. Кроме того, некоторую путаницу вносит и использование в англоязычной научной литературе аналогичного по написанию термина "cryostratigraphy" [French, 2007; Lapalme et al., 2015], под которым понимается изучение самого криогенного строения (криолитологические исследования), тогда как в отечественной литературе криостратиграфия имеет иной смысл [Лисицына, Тумской, 2016]. Однако в

работе "The principles of cryostratigraphy" [French, Shur, 2010] основной задачей криостратиграфии авторы полагают установление генезиса мерзлых отложений и истории развития этих отложений, что косвенно может использоваться при решении стратиграфических задач и сближает такой подход с представлениями отечественных исследователей.

В последнее время появились работы, в которых рассматриваются основы криостратиграфии как научного направления. Так, В.П. Мельников с соавт. [2015] пишет, что криостратиграфия – это "геокриологическая дисциплина, изучающая пространственные и временные соотношения криогенных образований горных пород криолитозоны" (с. 11). Элементарным объектом изучения является "литологически однородный слой, отличающийся по вещественному составу и криогенному строению от ниже- и вышележащих слоев", который представляет собой мерзлотную фацию [Там же, с. 11]. Криогенная формация понимается одновременно и как определенное единство мерзлотных фаций и как "...комплекс парагенетически связанных друг с другом генетических типов отложений с присущими им криогенными образованиями, сформировавшимися в едином цикле промерзания" [Там же, с. 12].

Ю.К. Васильчуком [2017] было введено еще одно понятие – циклокриостратиграфия. Под ней подразумевается "...изучение чередования различных по вертикальному масштабу пачек мерзлых пород в едомных разрезах. Целью циклокриостратиграфии является определение, характеристика и интерпретация периодических или квазипериодических вариаций в криостратиграфии многолетнемерзлых толщ (преимущественно синкриогенных) и их использование для построения и уточнения особенностей формирования многолетнемерзлых толщ" [Васильчук, 2017]. В таком понимании циклокриостратиграфию можно рассматривать как часть криостратиграфии, локализованную по объекту исследования.

Основные системные представления о криостратиграфии и криостратиграфическом изучении мерзлых пород были изложены Т.Н. Каплиной в ее докторской диссертации, однако они не были нигде полностью опубликованы. По ее мнению, криостратиграфия является ветвью или аналогом климатической стратиграфии и "...дает основания для расчленения толщ четвертичных отложений на геологические тела, для выяснения их последовательности в разрезах, для выявления ритмики геокриологических событий. Она не определяет места геологических тел на стратиграфической шкале и потому должна комплексироваться с другими методами стратиграфии" [Каплина, 1988, с. 269].

В чем же заключается отличие криостратиграфического подхода от других методов, используемых в рамках климатостратиграфических исследований? Многочисленные методы палеогеографических исследований, используемые в климатостратиграфии, позволяют реконструировать по косвенным данным климатические условия прошлого, ландшафтные и экологические условия на поверхности. На их основании делаются заключения о степени суровости климата, а формирование изученных отложений относят к эпохам термо- или криохронов.

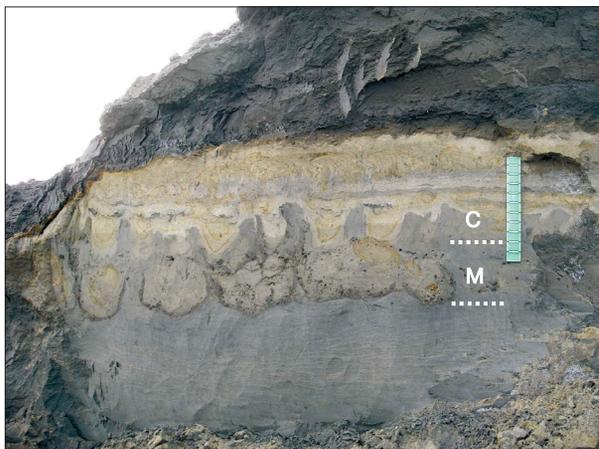
Криостратиграфический подход позволяет реконструировать последовательность промерзания и протаивания отложений, отражающую как закономерности изменения региональных климатических условий, так и изменчивость криофациальных (“микрорландшафтных”) условий на более локальном местном уровне, которые могут быть никак не связаны с климатическими изменениями. С помощью сопряженных исследований (криотекстурный метод, петрографические исследования подземных льдов, анализ их химического и изотопного состава и т. д.) можно получить дополнительные сведения об условиях промерзания и протаивания отложений, позволяющие уточнить или детализировать палеогеографические реконструкции. На уровне изучения взаимоотношений криофаций мерзлых толщ можно реконструировать последовательность их накопления, промерзания, размыва и протаивания, что особенно информативно для криолитогенных толщ. Определив тип криогенного строения криофаций и характер криогенных контактов между ними, мы можем установить криогенетический тип каждой криофации, т. е. реконструировать их криогенную историю. Если для определенной территории последовательность событий криогенеза будет в той или иной степени закономерно повторяться, мы можем объединять отложения одновозрастных криогенетических типов и групп криофаций в криогенные формации. На уровне криоформаций мы уже можем решать задачи относительного криостратиграфического расчленения мерзлых толщ в региональном масштабе. Дополнительная палеогеографическая информация, получаемая другими методами, позволит сопоставить криофациальное и криоформационное строение толщ с палеоклиматическими характеристиками условий формирования отложений и перейти к палеоклиматическим реконструкциям и палеоклиматостратиграфическим выводам.

Особое значение и свою специфику применения имеют палеокриолитологические исследования. Они основаны на том, что характерные деформации слоистости или особенности состава отложений могут быть обусловлены развитием

криогенных геологических процессов: выпучивания обломочного материала, пучения в слое сезонного промерзания (оттаивания), приводящего к криотурбациям, морозобойного растрескивания, солифлюкции, локального термокарста и т. д. Часть таких деформаций геологически синхронна процессам промерзания и подчеркивается их криогенным строением в синкриогенных толщах. Другие же криогенные нарушения были впоследствии преобразованы при протаивании, после чего могли эпигенетически промерзнуть вновь (рис. 4), а могли сохраниться в строении талых отложений.

Следы криолитогеоза часто присутствуют в современных мерзлых толщах, отражая следы истории их развития, а во многих случаях сохраняются в талых породах. В результате палеокриолитологические исследования могут производиться как в пределах современной криолитозоны, так и вне нее. В первом случае изучаются следы неполного протаивания мерзлых пород, когда в большинстве случаев более-менее однозначно понятно, в результате каких процессов и в каких геокриологических условиях образовалось первичное криогенное строение отложений, какие криогенные процессы происходили и к чему они привели. При этом как сами следы развития криогенных процессов, так и соотношение их с современным криогенным строением, наряду с собственно криогенным строением, позволяют реконструировать историю криолитогеоза, т. е. последовательность формирования криофаций. В этом случае результаты палеокриолитологических исследований напрямую способствуют решению криостратиграфических задач.

Во втором случае изучаются геологические следы криолитогеоза в областях бывшего распро-



**Рис. 4.** Следы криотурбаций в реликтовом сезонноталом слое, отражающие два этапа сокращения его мощности: максимальной (М) и средней (С).

В настоящее время отложения мерзлые.

странения мерзлых толщ. В этом случае результаты, полученные в рамках первого направления, часто позволяют актуализировать результаты исследований по второму направлению. Однако, поскольку во втором случае мы имеем дело уже с тальми породами, часто длительно тальми, необходимо помнить, что сходные геологические результаты могут быть связаны с развитием некриогенных процессов и их диагностирование не всегда однозначно. Вне области современной криолитозоны мы не имеем, естественно, криолитогенных отложений и практически никогда не можем однозначно выделить их дериваты. Поэтому криофациальные исследования и криостратиграфический анализ, разрабатываемые для собственно мерзлых пород, здесь имеют другой смысл и в том виде, в котором они проводятся в криолитозоне, в области развития тальных пород невозможны.

Тем не менее выделение толщ отложений, несущих следы криогенеза, имеет большое значение для реконструкции климатических и геокриологических условий прошлого, в том числе для целей стратификации отложений и периодизации истории их развития. Климатостратиграфическая роль криостратиграфического подхода возрастает по мере приближения к современной южной границе криолитозоны. Кроме того, она значима и в области развития несплошных мерзлых толщ, в тальных массивах между островами мерзлых пород.

По мнению автора, основная цель криостратиграфии в пределах криолитозоны – выделение горизонтов многолетнемерзлых пород, формировавшихся в сходных геокриологических условиях, в результате чего они могут быть использованы для относительной периодизации событий плейстоцена и голоцена. Для криолитогенных, в первую очередь синкриогенных, толщ история их развития во многом может совпадать с историей накопления и преобразования (частичного оттаивания и повторного промерзания) отложений и погребенных залежей пластовых льдов. Для эпикриогенных толщ результатами криостратиграфических исследований могут являться установление последовательности промерзания толщ и преобразование их при возникновении и вторичном промерзании таликов, формирование массивов внутригрунтовых подземных льдов и т. д.

Вне криолитозоны основной целью криостратиграфии (где ее целесообразно рассматривать как палеокриостратиграфию) является выделение горизонтов отложений, несущих следы криогенеза в определенные геологические эпохи [Каплина, Романовский, 1960; Величко, 1973, 2012; Сычева, 2012], и горизонтов, не имеющих таких следов. В отличие от представлений Т.Н. Каплиной [1986], относившей к палеокриогенной формации все породы, подвергавшиеся в позднем кайнозое

криогенезу, а в настоящий момент тальме, автор предлагает рассматривать различные горизонты отложений со следами криогенеза в плейстоцене как различные палеокриогенные формации, имеющие свой возраст и разделенные отложениями (формациями) разновозрастных термохронов или интерстадиалов.

В развитие идей Т.Н. Каплиной заключаем, что *криостратиграфия представляет собой одно из направлений климатостратиграфии, в рамках которого производится выделение геологических тел на основании их криогенного и(или) посткриогенного строения, установление последовательности их образования и последующего преобразования для решения стратиграфических задач.*

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ КРИОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первоначально расчленение толщи мерзлых пород при проведении криофациального анализа было предложено осуществлять в три этапа [Жесткова, 1982; Каплина, 1988]. На первом этапе происходит выделение фаций с учетом их криогенного строения и криогенных образований; на втором этапе реконструируются условия накопления и промерзания отложений (выясняется генезис отложений и палеогеографические условия промерзания); на третьем этапе устанавливаются пространственно-временные изменения условий осадконакопления и промерзания отложений. По более позднему представлению [Мельников и др., 2015], расчленение разреза происходит иначе: 1) выделение слоя (серии слоев); 2) литостратиграфический анализ слоя или серии слоев; 3) биостратиграфический анализ; 4) геохронологический анализ; 5) структурно-текстурный анализ криогенного строения; 6) определение криостратиграфического элемента (слоя, серии слоев); 7) выделение криостратотипа.

По мнению автора, в обоих случаях речь идет не о криостратиграфических исследованиях, а о комплексных криолитологических и палеогеографических исследованиях толщ мерзлых пород. Кроме того, выделение криостратотипов как элементов разреза мерзлых толщ, имеющих "...типические криотекстуры с индивидуальными характеристиками для однородных фаций" [Мельников и др., 2015, с. 12], с точки зрения автора принципиально невозможно. Это связано с тем, что криогенное строение может меняться по латерали даже в пределах криофации, а естественные обнажения, к которым стратотип должен быть привязан [Стратиграфический кодекс..., 2019], изменяются почти ежегодно. Криостратиграфические же исследования, предлагаемые в настоящей работе, основаны на проведении криофациального анализа и определении криогенетического типа мерзлых толщ,

на установлении последовательности формирования криофаций и выделении криогенных формаций крио- и термохронов. Именно соотношение между последними позволяет произвести расчленение толщи мерзлых пород на горизонты, имеющие криостратиграфическое значение. В совокупности с дополнительными палеогеографическими данными выделенные криогенные формации приобретают климатостратиграфический смысл и могут быть использованы для целей стратиграфии четвертичных образований.

Порядок проведения исследований при этом представляется следующим:

1) выделение криофаций на основе их криогенного строения;

2) установление типов криогенных контактов между ними и реконструкция последовательности их образования;

3) определение криогенетического типа отложений криофаций;

4) выделение криоформаций на уровне криогенетических групп или рядов, установление пространственно-временных взаимоотношений между ними. Именно на этом этапе осуществляется криостратиграфическое расчленение толщи мерзлых пород;

5) привлечение дополнительных данных для решения климатостратиграфических вопросов и установления ранга криоформаций – регионального или локального уровня.

При использовании палеокриостратиграфии вне области современного развития криолитозоны последовательность осуществления работ в целом остается аналогичной, только для выделения палеокриофаций и палеокриоформаций используются не особенности криогенного строения пород, а палеокриогенные признаки, чаще всего структурные, сохранившиеся в талых породах.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие криолитологии и обновление геологических карт четвертичных образований для обширных территорий Сибири и Северо-Востока привело к возрождению потребности в мерзлотно-исторических исследованиях и их практическом приложении – криостратиграфическом подходе к расчленению толщ мерзлых отложений. Для его реализации предложено современное понимание криофаций и принципов их выделения, предложены некоторые общие типы криогенного строения, введено понятие криогенных контактов и обоснованы три их типа – седиментационно-криогенные, эрозионно-криогенные и контакты протаивания. На основе развивающегося учения о криогенетических типах мерзлых толщ предложено новое понимание криогенной формации. Для целей расчленения мерзлых четвертичных образований в криолитозоне, с учетом имеющихся работ

(в первую очередь Т.Н. Каплиной), обоснован криостратиграфический подход, наиболее эффективно использующийся для внеледниковых районов и представляющий собой одно из направлений климатостратиграфии. Показано, что за пределами современной криолитозоны может и должен использоваться палеокриостратиграфический подход. Обоснован порядок проведения криостратиграфических исследований и последовательность использования криофациального и криоформационного методов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 21-17-00054).*

### Литература

- Алексеев В.Р.** Геометрия криолитозоны. Якутск, Изд-во ИМЗ СО РАН, 2015, 122 с.
- Астахов В.И.** Начала четвертичной геологии: учеб. пособие. СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008, 224 с.
- Бадю Ю.Б.** Криолитология: учеб. пособие. М., Изд-во КДУ, 2010, 528 с.
- Бадю Ю.Б., Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К.** Основные закономерности распространения и типы пластовых залежей подземного льда в северной части Западно-Сибирской плиты // Пластовые льды криолитозоны. Якутск, ИМЗ СО АН СССР, 1982, с. 13–24.
- Васильчук Ю.К.** Циклокриостратиграфия едомных толщ. Часть 1 // Арктика и Антарктика, 2017, № 1, с. 62–83.
- Васьковский А.П.** Очерк стратиграфии антропогенных (четвертичных) отложений крайнего Северо-Востока Азии // Геология Корякского нагорья. М., Госгортехиздат, 1963, с. 143–168.
- Величко А.А.** Основные особенности реликтовой криогенной морфоскульптуры и принципы ее картирования // Палеокриология в четвертичной стратиграфии и палеогеографии. М., Наука, 1973, с. 121–134.
- Величко А.А.** Эволюционная география: проблемы и решения. М., ГЕОС, 2012, 563 с.
- Втюрин Б.И., Гасанов Ш.Ш.** Мерзлотно-фациальный метод и его значение // Очерки региональной и исторической криологии (Тр. Ин-та мерзлотоведения, т. XVIII). М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 103–107.
- Втюрин Б.И., Григорьев Н.Ф., Катасонов Е.М. и др.** Местная стратиграфическая схема четвертичных отложений побережья моря Лаптевых // Труды Межведомственного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем Сибири 1956 г. Л., Гостоптехиздат, 1957, с. 564–572.
- Вьлцан И.А.** Фации и формации осадочных пород. Томск, ТГУ, 2002, 484 с.
- Геологический словарь.** В 3-х т. 3-е изд., перераб. и доп. / Гл. ред. О.В. Петров. Т. 3. Р–Я. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2012, 440 с.
- Гусев А.И.** К стратиграфии четвертичных отложений западной части Приморской равнины // Тр. НИИГА, 1958, т. 80, вып. 5, с. 79–86.
- Демидюк Л.М., Рыжов Б.В., Шеко А.И.** О генезисе замкнутых котловин Ингодино-Читинской депрессии и их инженерно-геологическая оценка // Вопр. инж. геологии и грунтоведения, 1963, вып. 1, с. 116–123.

- Достовалов Б.Н.** Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 403 с.
- Ермолаев М.М.** Геологический и геоморфологический очерк острова Большого Ляховского // Полярная геофизическая станция на острове Большом Ляховском (Тр. СОПС, сер. якутская, вып. 7). Л., 1932, с. 147–223.
- Ершов Э.Д.** Криолитогенез. М., Недра, 1982, 211 с.
- Жесткова Т.Н.** Формирование криогенного строения грунтов. М., Наука, 1982, 216 с.
- Зубаков В.А.** Глобальные климатические события плейстоцена. Л., Гидрометеиздат, 1986, 288 с.
- Иванов О.А., Яшин Д.С.** Новые данные о геологическом строении острова Новая Сибирь // Тр. НИИГА, 1959, т. 96, вып. 8, с. 61–78.
- Каплина Т.Н.** История мерзлых толщ северной Якутии в позднем кайнозое // История развития многолетнемерзлых пород северной Евразии. М., Наука, 1981, с. 153–181.
- Каплина Т.Н.** О криогенных формациях // Формирование мерзлых пород и прогноз криогенных явлений. М., Наука, 1986, с. 3–14.
- Каплина Т.Н.** Криолитогенез позднего кайнозоя на аккумулятивных равнинах Северо-Востока СССР: Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М., 1988, 317 с.
- Каплина Т.Н., Романовский Н.Н.** О псевдоморфозах по полигональному льду // Перигляциальные явления на территории СССР. М., Наука, 1960, с. 47–59.
- Катасонов Е.М.** Мерзлотно-фациальные исследования многолетнемерзлых толщ и вопросы палеогеографии четвертичного периода Сибири // Основные проблемы изучения четвертичного периода. К VII Конгрессу INQUA, США, 1965. М., Наука, 1965, с. 286–294.
- Катасонов Е.М.** Закономерности развития криогенных явлений // Сб. докл. на XXII Междунар. географическом конгрессе (Монреаль, авг. 1972 г.). М., Наука, 1972, с. 28–35.
- Катасонов Е.М.** Мерзлотно-фациальный анализ как основной метод криолитологии // II Междунар. конф. по мерзлотоведению: докл. и сообщ. Вып. 3. Генезис, состав и строение мерзлых толщ и подземные льды. Якутск, Кн. изд-во, 1973, с. 29–37.
- Катасонов Е.М.** Литология мерзлых четвертичных отложений (криолитология) Янской приморской низменности. М., ПНИИИС, 2009, 176 с.
- Крашенинников Г.Ф.** Учение о фациях: учеб. пособие. М., Высш. шк., 1971, 368 с.
- Лисицына О.М., Тумской В.Е.** Криостратиграфия: современные представления и пути развития // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 2, с. 195–201.
- Мельников В.П., Брушков А.В., Хименков А.Н.** О развитии теоретических основ геокриологии // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 6–14.
- Попов А.И.** Особенности литогенеза аллювиальных равнин в условиях сурового климата // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1953, № 2, с. 29–43.
- Попов А.И.** Подземный лед // Подземный лед. М., Изд-во Моск. ун-та, 1965, вып. I, с. 7–39.
- Попов А.И.** Криолитология / А.И. Попов, Г.Э. Розенбаум, Н.В. Тумель. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 239 с.
- Решения** Межведомственного стратиграфического совещания по четвертичной системе Востока СССР (Магадан, 1982 г.). Объяснит. зап. к регион. стратигр. схемам четвертичных отложений Востока СССР. Магадан, СВКНИИ ДВО АН СССР, 1987, 241 с.
- Романовский Н.Н.** О строении Яно-Индибирской приморской аллювиальной равнины и условиях ее формирования // Мерзлотные исслед., 1961, вып. II, с. 129–138.
- Романовский Н.Н.** Основы криогенеза литосферы. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 336 с.
- Сакс В.Н.** Четвертичный период в Советской Арктике // Тр. Всесоюз. АНИИ. М.; Л., Изд-во Главсевморпути, 1948, т. 201, 131 с.
- Стратиграфический** кодекс России. 3-е изд., испр. и доп. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2019, 96 с.
- Сычева С.А.** Палеомерзлотные события в перигляциальной области Среднерусской возвышенности в конце среднего и позднем плейстоцене // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 4, с. 45–56.
- Томирдиаро С.В.** Криолитоологические критерии стратиграфического расчленения эолово-криогенных отложений едомного комплекса на Северо-Востоке СССР // Мерзлотно-геологические процессы и палеогеография низменностей Северо-Востока Азии. Магадан, СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1982, с. 54–58.
- Тумской В.Е.** Геологическое строение и возраст отложений ледового комплекса в районе обнажения Мус-Хая (р. Яна) // Материалы Междунар. конф. “Криосфера нефтегазоносных провинций” (Тюмень). М., Тиссо, 2004, с. 81.
- Тумской В.Е.** Особенности криолитогенеза отложений Северной Якутии в среднем неоплейстоцене–голоцене // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 12–21.
- Усов В.А.** Криолитогенные фации арктического побережья // Грунтоведение, 2015, № 2, с. 19–25.
- Цейслер В.М.** Формационный анализ. М., Изд-во РУДН, 2002, 186 с.
- Шанцер Е.В.** Очерки учения о генетических типах континентальных осадочных образований // Тр. ГИН АН СССР. М., Наука, 1966, вып. 161, 239 с.
- Шванов В.Н.** Опыт классификации осадочных формаций по вещественным (литомологическим) признакам // Вестн. Ленингр. гос. ун-та, 1982, № 24, с. 43–52.
- French H.M.** The Periglacial Environment. N.Y., John Wiley & Sons Ltd., 2007, 458 p.
- French H., Shur Yu.** The principles of cryostratigraphy // Earth-Science Rev., 2010, vol. 101, p. 190–206.
- Lapalme C.M., Lacelle D., Davila A.F. et al.** Cryostratigraphy of nearsurface permafrost in University Valley, McMurdo Dry Valleys of Antarctica // Conference Paper: GeoQuebec. Quebec, Canada, 2015, Abs 352.
- Mackay J.R.** Segregated epigenetic ice and slumps in permafrost, Mackenzie Delta area, N.W.T. // Geographical Bulletin, 1966, iss. 8, p. 59–80.

## References

- Alekseev V.R. Geometriya kriolitozony [Geometry of the Cryolithozone]. Yakutsk, IMZ SO RAN, 2015, 122 p. (in Russian).
- Astakhov V.I. Nachala chetvertichnoi geologii [Foundation of Quaternary Geology]. St. Petersburg, Izd-vo SPb. universiteta, 2008, 224 p. (in Russian).
- Badu Yu.B. Kriolitologiya [Cryolithology]. Moscow, Izd-vo KDU, 2010, 528 p. (in Russian).
- Badu Yu.B., Trofimov V.T., Vasil'chuk Yu.K. General regularities of distribution and the kinds of massive ground ice in the northern part of Western Siberia plate. In: Plastovye l'dy kriolitozony [Massive Ground Ice of Cryolithozone]. Yakutsk, IMZ SO AN SSSR, 1982, p. 13–24 (in Russian).

- Vasil'chuk Yu.K. Cycles in stratigraphy of Yedoma deposits. Part 1. In: *Arktika i Antarktika* [Arctic and Antarctica], 2017, No. 1, p. 62–83 (in Russian).
- Vas'kovsky A.P. Stratigraphy review of the Anthropocene (Quaternary) deposits of the far North-East of Asia. In: *Geologiya Koryakskogo nagorya* [Geology of the Koryak Upland]. Moscow, Gosgortekhizdat, 1963, p. 143–168 (in Russian).
- Velichko A.A. Main peculiarities of relic cryogenic relief and the principles of its mapping. In: *Paleokriologiya v chetvertichnoi stratigrafii i paleogeografii* [Paleocryology in the Quaternary stratigraphy and paleogeography]. Moscow, Nauka, 1973, p. 121–134 (in Russian).
- Velichko A.A. *Evolutsionnaya geografiya: problemy i resheniya* [Evolutionary Geography: Problems and Solutions]. Moscow, GEOS, 2012, 563 p. (in Russian).
- Vtyurin B.I., Gasanov Sh.Sh. Cryofacial method and its importance. In: *Ocherki regionalnoi i istoricheskoi kriologii* (Trudy Instituta Merzlotovedeniya, t. XVIII) [Reviews of the regional and historical cryology (Proceedings of Permafrost Institute, vol. XVIII)]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1962, p. 103–107 (in Russian).
- Vtyurin B.I., Grigoriev N.F., Katasonov E.M. et al. Local stratigraphy of Quaternary deposits onshore Laptev Sea. In: Proc. of Interdepartmental Meeting for Preparation of Uniform Stratigraphic Charts of Siberia, 1956. Leningrad, Geostoptekhizdat, 1957, p. 564–572 (in Russian).
- Vyltsan I.A. *Fatsii i formatsii osadochnykh porod* [Facies and Formations of Sedimentary Rocks]. Tomsk, TGU, 2002, 484 p. (in Russian).
- Dictionary of Geology. In three volumes. 3 ed. / Ed. by O.V. Petrov. Vol. 3. P–Ya. St. Petersburg, VSEGEI, 2012, 440 p. (in Russian).
- Gusev A.I. To the stratigraphy of Quaternary deposits on the western part of Coastal plain. In: *Trudy NIIGA* [Proceedings of the Institute of Geology of Arctic], 1958, vol. 80, iss. 5, p. 79–86 (in Russian).
- Demidyuk L.M., Ryzhov B.V., Sheko A.I. On the genesis of enclosed depressions within Ingoda-Chita basin and its geotechnical investigation. In: *Voprosy inzhenernoi geologii i gruntovedeniya* [Problems of Engineering Geology and Soil Science], 1963, iss. 1, p. 116–123 (in Russian).
- Dostovalov B.N., Kudryavtsev V.A. *Obshchee merzlotovedenie* [General Geocryology]. Moscow, Izd-vo MGU, 1967, 403 p. (in Russian).
- Ermolaev M.M. Geological and geomorphological review of Bol'shoy Lyakhovskiy Island. In: *Trudy SOPS* [Proceedings of SOPS], Yakutian series, iss. 7. Leningrad, 1932, p. 147–223 (in Russian).
- Ershov E.D. *Kriolitogenez* [Cryolithogenesis]. Moscow, Nedra, 1982, 211 p. (in Russian).
- Zhestkova T.N. *Formirovanie kriogennogo stroeniya gruntov* [Formation of Ground Cryostratigraphy]. Moscow, Nauka, 1982, 216 p. (in Russian).
- Zubakov V.A. *Globalnye klimaticheskie sobytiya Pleistotsena* [Global Climatic Events in Pleistocene]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986, 288 p. (in Russian).
- Ivanov O.A., Yashin D.S. New data on geology of the Novaya Sibir' Island. In: *Trudy NIIGA* [Proceedings of NIIGA], 1959, vol. 96, iss. 8, p. 61–78 (in Russian).
- Kaplina T.N. Permafrost history of the Northern Yakutia in the Late Cenozoic. In: *Istoriya razvitiya mnogoletnemerzlykh porod severnoy Evrazii* [Evolution of Ice-rich Permafrost in Northern Eurasia]. Moscow, Nauka, 1981, p. 153–181 (in Russian).
- Kaplina T.N. About cryogenic formations. In: *Formirovanie merzlykh porod i prognoz kriogennykh yavleniy* [Ice-rich Permafrost Formation and Forecast of Cryogenic Processes]. Moscow, Nauka, 1986, p. 3–14 (in Russian).
- Kaplina T.N. Cryolithogenesis during the Late Cenozoic on accumulative plains of North-East of USSR: Doctoral Thesis. Moscow, 1988, 317 p. (in Russian).
- Kaplina T.N., Romanovskii N.N. About ice-wedge casts. In: *Periglyatsialnye yavleniya na territorii SSSR* [Periglacial Forms on the USSR Territory]. Moscow, Nauka, 1960, p. 47–59 (in Russian).
- Katasonov E.M. Cryofacial investigations of ice-rich permafrost and some questions of Quaternary paleogeography in Siberia. In: *Osnovnye problemy izucheniya chetvertichnogo perioda. K VII Kongressu INQUA, USA* [Main problems of Quaternary investigations. To the VII Congress of INQUA, USA]. Moscow, Nauka, 1965, p. 286–294 (in Russian).
- Katasonov E.M. Regularities of development of cryogenic processes. In: *Sbornik dokladov na XXII mezhdunarodnom geograficheskom kongresse, Montreal* [Extended abstracts of XXII International geographical Congress, Montreal]. Moscow, Nauka, 1972, p. 28–35 (in Russian).
- Katasonov E.M. Cryofacial analysis as the main method of cryolithology. In: *Vtoraya mezhdunarodnaya konferentsiya po merzlotovedeniyu* [II International Conference on Permafrost]. Abstracts, vol. 3: Genesis, composition and structure of ice-rich permafrost and ground ice. Yakutsk, Kn. izd-vo, 1973, p. 29–37 (in Russian).
- Katasonov E.M. *Litologiya merzlykh chetvertichnykh otlozhenii (kriolitologiya) Yanskoi primorskoj nizmennosti* [Lithology of Quaternary Frozen Grounds (Cryolithology) of the Yana Coastal Plain]. Moscow, PNIIS, 2009, 176 p. (in Russian).
- Krashennnikov G.F. *Uchenie o fatsiyakh* [Studying on Facies]. Moscow, Vysshaya shkola, 1971, 368 p. (in Russian).
- Lisitsyna O.M., Tumskey V.E. Permafrost stratigraphy: modern knowledge and perspectives. In: *Abstracts of 5th Conference of Russian Geocryologists* (Moscow, June 14–17, 2016). Moscow, 2016, vol. 2, p. 195–201 (in Russian).
- Melnikov V.P., Brouchkov A.V., Khimenkov A.N. Developing the theoretical background of geocryology. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. XIX, No. 2, p. 6–12.
- Popov A.I. Peculiarities of lithogenesis on alluvial plains under severe climate. In: *Izvestiya AN SSSR* [Bulletin of Academia of Science, USSR]. Series Geography, 1953, No. 2, p. 29–43 (in Russian).
- Popov A.I. *Underground ice // Podzemniy led* [Underground Ice]. Moscow, Izd-vo MGU, 1965, iss. 1, p. 7–39 (in Russian).
- Popov A.I., Rozenbaum G.E., Tumel N.V. *Kriolitologiya* [Cryolithology]. Moscow, Izd-vo MGU, 1985, 239 p. (in Russian).
- Decision of interdepartmental stratigraphic meeting for Quaternary of East of USSR (Magadan, 1982). Explanatory letters for regional stratigraphic charts of Quaternary deposits of East of USSR. Magadan, 1987, 241 p. (in Russian).
- Romanovskii N.N. About structure of Yana-Indigirka onshore alluvial plain and conditions of its formation. In: *Merzlotnye issledovaniya* [Permafrost Investigations], 1961, iss. II, p. 129–138 (in Russian).
- Romanovskii N.N. *Osnovy kriogeneza litosfery* [Foundations of Cryogenesis of Lithosphere: textbook]. Moscow, Izd-vo MGU, 1993, 336 p. (in Russian).
- Saks V.N. Quaternary in the Soviet Arctic. In: *Trudy Vsesoyuznogo ANII* [Proceedings of Soviet Arctic Institute]. Moscow, Leningrad, Izd-vo Glavsevmorputi, 1948, vol. 201, 131 p. (in Russian).

- Stratigraphic code of Russia. 3rd ed. St. Petersburg, VSEGEI, 2019, 96 p. (in Russian).
- Sycheva S.A. Paleocryogenic events in periglacial area of the Central Russian Upland at the end of the Middle and Late Pleistocene. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2012, vol. XVI, No. 4, p. 45–56 (in Russian).
- Tomirdiaro S.V. Cryolithological criteria of stratigraphic division of eolian-cryogenic deposits of Yedoma complex on the North-East of USSR. In: *Merzlotno-geologicheskie protsessy i paleogeografiya nizmennostei Severo-Vostoka Azii [Cryogenic Processes and Paleogeography of North-East Asia Lowlands]*. Magadan, SVKNII DVNC AN SSSR, 1982, p. 54–58 (in Russian).
- Tumskoy V.E. Geological structure and age of Ice Complex deposits around of Mus-Khaya outcrop (Yana River). In: Abstracts of International conference “Cryosphere of oil-gas provinces” (Tyumen). Moscow, Tisso, 2004, p. 81 (in Russian).
- Tumskoy V.E. Peculiarities of cryolithogenesis in Northern Yakutia (Middle Neopleistocene to Holocene). *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2012, vol. XVI, No. 1, p. 12–21 (in Russian).
- Usov V.A. Cryolithogenic facies of the Arctic coastal zone. In: *Gruntovedenie [Soil Science]*, 2015, No. 2, p. 19–25 (in Russian).
- Tseisler V.M. *Formatsionnyi analiz [Analysis of Formations]*. Moscow, RUDN, 2002, 186 p. (in Russian).
- Shantser E.V. Principles of the studies of genetic types of continental sedimentary formations. In: *Trudy GIN AN SSSR [Transactions GIN AN USSR]*. Moscow, Nauka, 1966, iss. 161, 239 p. (in Russian).
- Shvanov V.N. Classification of sedimentary formations on composition characteristics. *Vestnik Leningradskogo universiteta [Newsletter of Leningrad State University]*, 1982, No. 24, p. 43–52 (in Russian).
- French H.M. *The Periglacial Environment*. N.Y., John Wiley & Sons Ltd., 2007, 458 p.
- French H., Shur Yu. The principles of cryostratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 101, p. 190–206.
- Lapalme C.M., Lacelle D., Davila A.F. et al. Cryostratigraphy of nearsurface permafrost in University Valley, McMurdo Dry Valleys of Antarctica. In: *Conference Paper: GeoQuebec*. Quebec, Canada, 2015, Abs 352.
- Mackay J.R. Segregated epigenetic ice and slumps in permafrost, Mackenzie Delta area, N.W.T. *Geographical Bulletin*, 1966, iss. 8, p. 59–80.

*Поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.,  
после доработки – 4 марта 2021 г.,  
принята к публикации 11 марта 2021 г.*