НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 6–14 http://www.izdatgeo.ru

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.2/3

О РАЗВИТИИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ГЕОКРИОЛОГИИ

В.П. Мельников, А.В. Брушков*, А.Н. Хименков**

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; melnikov@ikz.ru
**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; brouchkov@hotmail.com*
***Институт геоэкологии имени Е.М. Сергеева РАН, 101000, Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, Россия; cryo@geoenv.ru*

Существует объективная потребность дальнейшего совершенствования теории формирования криолитозоны. Рассмотрены методологические подходы создания основ криостратиграфии, включающие разработку критериев определения криостратиграфических горизонтов и выделения локальных и территориальных криостратотипов. Обоснована необходимость развития мерзлотно-фациального анализа, предложенного Е.М. Катасоновым, в отношении эпигенетических многолетнемерзлых пород. Отмечена важность изучения роли живого вещества в криолитозоне.

Криолитология, мерзлотно-фациальный анализ, криостратиграфия

ON THE DEVELOPMENT OF FUNDAMENTALS OF GEOCRYOLOGY

V.P. Melnikov, A.V. Brouchkov*, A.N. Khimenkov**

Earth Cryosphere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; melnikov@ikz.ru
** Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; brouchkov@hotmail.com*
*** Sergeev Institute of Geoecology, RAS, 101000, Moscow, Ulansky per., 13, build. 2, Russia; cryo@geoenv.ru*

There is an objective requirement of further improvement of the cryolithozone formation theory. Some methodological approaches to studing of the bases of cryostratigraphy, including the development of criteria for definition of the cryostratigraphical horizons and techniques for allocation of local and territorial cryostratypes, are considered. Need for further development of the permafrost-facial analysis in relation to epigenetical permafrost offered by E.M. Katasonov is proved. The importance of studying live substance in cryolithozone is designated.

Cryolithology, permafrost-facial analysis, cryostratigraphy

Цель статьи – продолжить разработку положений геосистемного подхода в геокриологии, изложенного авторами ранее [*Хименков, 2006, 2013; Мельников, 2010*]. Основное внимание уделяется оценке роли криогенных преобразований в осадочных толщах и рассмотрению вопросов, связанных с расширением мерзлотно-фациального анализа путем включения в него эпикриогенных пород, разработке положений криостратиграфии.

КРИОГЕНЕЗ КАК ОСНОВА ЛИТОГЕНЕЗА ПРОМЕРЗАЮЩИХ ПОРОД

Криогенез. Исследуя осадочную породу, мы описываем современное ее состояние, которое может быть лишь одной из стадий осадочного цикла. Литологи под понятиями “стадия”, “подстадия” и “надстадия” имеют в виду строго определенные этапы внутри цикла осадконакопления: 1) мобилизация вещества (гипергенная, биогенная, но не вулканогенная); 2) перенос; 3) накопление (седиментация); 4) диагенез; 5) катагенез; 6) метагенез.

Совокупность процессов, связанных с фазовыми переходами воды, промерзанием и оттаиванием, получила название *криогенеза*. Он включает всю совокупность физических, химических, биохимических и других процессов, происходящих в пределах криосферы на всех указанных стадиях осадочного цикла, за исключением катагенеза и метагенеза, для которых характерны высокие температуры.

Криогенез в природных условиях может наблюдаться во всех типах горных пород и на многих стадиях их преобразований. Так, важной составной частью выветривания являются фазовые переходы воды, которые играют ведущую роль в разрушении минералов и горных пород. Осадочные

© В.П. Мельников, А.В. Брушков, А.Н. Хименков, 2015

горные породы из-за значительного содержания воды в порах подвергаются криогенезу в наибольшей степени.

Выяснением состава, строения и, главное, генетикой осадочных и вулканогенно-осадочных образований занимается один из фундаментальных разделов геологической науки – литология [*Тимофеев, 1987*]. В геокриологии данным направлением занимается криолитология. "Криолитология – раздел геолого-географических наук о составе, строении и закономерностях пространственного размещения мерзлых горных пород. Она изучает часть литосферы, находящуюся в определенных гидротермических условиях. Следовательно, объектом криолитологии являются материальные тела зонального уровня организации вещества в иерархии систем (от зоны в целом до мерзлой породы)" [*Гасанов, 1981, с. 6*].

Криоаутигенез. Мерзлые породы могут включать не только осадочные, но и метаморфические, или магматические, породы. Так же как и осадочные породы, их можно разделить на две главные генетические категории: 1) возникшие непосредственно *in situ*, или так называемые *аутигенные* образования; 2) возникшие разными способами ранее и не в месте осадкообразования, а привнесенные водными потоками, льдом, ветрами или силами гравитации из иных участков земной поверхности, аллотигенные компоненты. И те и другие делятся также на генетические и стадиально-возрастные таксоны [*Япаскурт, 2008*]. В случаях количественного преобладания аллотигенного материала аутигенное вещество осадочных пород часто скрепляет частицы этого материала, и такое аутигенное вещество рассматривается в качестве цемента. Для случая мерзлых осадочных пород таким аутигенным веществом является лед, хотя при значительном содержании он может стать и породообразующим материалом.

Аутигенное минералообразование, или аутигенез, – один из важнейших факторов породообразования. Можно ли рассматривать лед как аутигенный минерал? По нашему мнению, безусловно. Аутигенез является процессом образования минералов *in situ* и обычно употребляется в отношении осадочных пород при достаточно низких температурах [*Диагенез..., 1971*]. Нестабильность льда как минерала в литосфере не является препятствием, – подобным образом ведут себя, например, карбонаты, хлориды и некоторые другие минералы, появляясь и вновь исчезая из состава пород. При этом литологи, как правило, рассматривают парагенезы аутигенных минералов как основу для определения стадийности осадко- и породообразования. В нашем случае *появление льда в породе может рассматриваться как особая и важная стадия преобразования осадков или осадочных горных пород*. Особенность этой стадии – в существенном изменении свойств пород при исключительной динамичности (и во многих случаях кратковременности) ее существования. Необходимость ее выделения связана также с объемом вовлекаемых пород – криолитозона, как известно, занимает огромные пространства Евразии, Северной Америки и других районов и простирается на сотни метров в литосферу.

Криогипергенез. *Криогенез*, как уже отмечалось, *участвует в ряде стадий литогенеза* и прежде всего в его начале – гипергенезе. По А.Е. Ферсману [*1977*], под последним понимается комплекс химических, био- и физико-химических явлений, которые происходят на границе между атмосферой и твердой земной оболочкой. Горные породы подвергаются воздействию газов, вод, биологического вещества и колебаниям температуры и других физико-химических параметров в условиях неравновесной системы. Фазовые переходы воды участвуют как в деструктивной составляющей гипергенеза (коррозия минералов, физическое выветривание и другие явления), так и в ее конструктивной части и, в первую очередь (но не только), в образовании ледяных включений как составной части породы. Известно, что огромное значение в качестве минерализаторов имеют микроорганизмы. Однако роль органического вещества в гипергенезе, в том числе живого, при температурах ниже нуля практически неизвестна и нуждается в изучении. Зона гипергенеза обычно рассматривается как относительно неглубокая с нижней границей, совпадающей с уровнем верхнего водоносного горизонта. Однако при глубоком промерзании эта зона, очевидно, может распространяться вплоть до границы промерзания. Впрочем, в тектонически активных зонах гипергенез может проникать внутрь литосферы на километровые глубины [*Вассоевич, 1962*].

Промерзание, как известно, важный компонент физического выветривания за счет разрушающего воздействия льдообразования. Его влияние настолько велико, что группа сопутствующих ему процессов может быть названа *криогипергенезом*. Несмотря на то, что, по Н.М. Страхову [*1960*], степень изменения выветриваемых пород невелика в условиях *ледового* (*нивального*) литогенеза, само образование мерзлых пород существенно изменяет текстуру литосферы и ее свойства. Перенос вещества и его седиментация имеют существенные особенности в криолитозоне. Они заключаются прежде всего в ограничении величины водных потоков и изменении объема водоемов во времени, значительном влиянии сезонности на гидрологические характеристики, а также в особой роли эоловых процессов.

Стратисферой Л.В. Пустовалов в свое время называл совокупность осадочных пород, возникших за всю историю Земли, сохранившихся от де-

нудации и не перешедших в состояние метаморфических образований [*Пустовалов, 1940*]. Мерзлые породы, таким образом, входят в ее состав. Небольшое внимание к ним литологов в прошлом объясняется тем, что после оттаивания и дальнейших преобразований следы их криогенного состояния находятся с трудом. Кроме того, нахождение в мерзлом состоянии часто не приводит к принципиальным изменениям в породах. Однако в настоящее время, с увеличением детальности исследований, такие следы обнаруживаются. Одним из примеров могут служить широко распространенные лессы, в формировании которых большую роль играет криогенез [*Трофимов, Васильчук, 1988*]. В будущем, несомненно, в осадочных породах будут найдены многие другие следы льдообразования, прежде всего, вероятно, в их структуре и текстуре. Это направление в настоящее время развивается В.Н. Конищевым и В.В. Роговым [*2008*]. Важнейший в литологии "фактор давления", приводящий к уплотнению породы, рассмотренный в работах Н.В. Логвиненко [*1984*], Б.А. Лебедева [*1992*] и др., может возникать и при промерзании осадков и осадочных горных пород. Известно, что льдообразование в дисперсных породах в определенных условиях сопровождается возникновением значительных механических напряжений [*Брушков, 1998*]. Направление в криологии, связанное с идентификацией следов криогенных процессов, условий и образований в настоящем и прошлом, получило название "криотрасология" [*Мельников, Геннадиник, 2011*].

Криодиагенез. Дегидратация минералов с точки зрения литологов – распространенный и важный процесс, который характерен и для промерзания отложений. Он приводит к минеральным трансформациям, а также перекристаллизации минералов, однако для криогенеза изучен недостаточно. В бассейнах осадочного породообразования продолжают развиваться процессы дифференциации вещества [*Япаскурт, 2008*]. Начало литификации осадков относится литологами к стадии *диагенеза*, который может охватывать всю стратисферу, но характерен преимущественно для верхних горизонтов в десятки метров. На этой стадии происходят вещественно-структурные изменения в осадке, переводящие его в горную породу. Вода является средой и проводником диагенетических процессов. При *субаквальном диагенезе* ее содержание может составлять до 95 % массы осадка. В условиях *субаэрального диагенеза* содержание воды значительно меньше. А.В. Копелиович [*1965*] предложил считать этапом окончания диагенеза переход глинистых отложений из текучеполужидкой консистенции в пластично-полутвердую, а для песчаных отложений этот же этап соотносить с моментом литификации перекрывающего слоя глины. Основные процессы при диагенезе включают: коррозию минералов, гидролиз, окисление и дегазацию осадков, диффузию ионов, выпадение в осадок и др. *Промерзание отложений* сокращает количество свободной воды, увеличивает концентрацию растворимых компонентов, плотность минеральных прослоев, приводит к структурообразованию и формированию льда-цемента, упрочняющего отложения. При этом криогенез осуществляется при одновременном развитии в осадках других диагенетических процессов. Поэтому оправданно считать эту стадию литогенеза при низких температурах *криодиагенезом*.

Криодиагенез является лишь частью общего процесса диагенеза, а не полностью подменяет его в холодных областях, поскольку не ведет к минеральной литификации (окаменению) изначально рыхлого осадка. Переход осадков в мерзлое состояние и их упрочнение за счет формирования льда-цемента и ледяных включений является временным состоянием. При изменении температуры, как правило, неизбежном при продолжительном времени существования осадочных толщ и их постепенном погружении (и соответственном оттаивании), такие отложения, хотя и могут претерпеть определенные изменения, но обычно теряют прочность и далеки от стадии литифицирования. На самом деле мерзлое состояние лишь откладывает момент их литификации, и то не всегда. В засоленных мерзлых осадках свободная вода может выделяться в виде минерализованного раствора при повышении температуры на несколько градусов, при этом в грунтах сохраняется присущее им криогенное строение.

Одним из важных показателей степени диагенетических преобразований осадков является наличие живого вещества в них. Н.М. Страхов и Н.В. Логвиненко, отмечая огромную роль бактерий в процессах диагенеза, считали одним из признаков завершения стадии диагенеза исчезновение в осадках живых микроорганизмов [*Страхов, Логвиненко, 1959*]. По этому признаку мерзлые отложения далеки от подобного завершения. Действительно, в мерзлых породах активность органических процессов снижается. Здесь бактериальные клетки и даже тела животных сохраняются десятки и сотни тысяч лет. К сожалению, об активности микроорганизмов в мерзлых породах, несмотря на их значительное содержание [*Звягинцев и др., 1985; Брушков и др., 2009*], известно крайне мало.

Мерзлотно-фациальный анализ. Одним из важных понятий *генетической литологии* является понятие о *фации*, которое ввел в науку А. Грессли еще в 1839 г., имея в виду одновозрастные породы, сформированные в различных условиях. Фацию соотносят с обстановкой формирования, овеществленной в осадках или породах [*Жемчужников и др., 1959; Тимофеев, 1969*]. Одним из развивающихся направлений является *литолого-фациаль-*

ный анализ, представляющий собой начальный этап формационного анализа осадочных толщ. Е.М. Катасонов, считая мерзлые отложения горными породами, в соответствии с принятым в литологии подходом ввел в науку представления о *мерзлотно-фациальном анализе*. На примере изучения закономерностей сингенетического промерзания аллювиальных отложений был разработан метод генетического анализа многолетнемерзлых пород (ММП) в совокупности с их криогенным строением [*Катасонов, 1962*]. Е.М. Катасонов мерзлотно-фациальный метод определял одновременно и как метод геокриологических фаций. Сущность его в том, что при изучении мерзлых осадочных толщ выделяются фации, которые характеризуются не только определенными условиями накопления осадков, но и особенностями их промерзания. *Геокриологическая фация*, т. е. фация, существенным признаком которой является закономерное распределение в ней льда, характеризуется двумя группами признаков. Во-первых, механическим составом, первичной слоистостью, фауной, количеством и характером растительных остатков; во-вторых, льдистостью, формой, размером и взаимным расположением ледяных включений (криогенной текстурой, строением ледяных шлиров). Эти две группы признаков не накладываются друг на друга, а связаны фациально. Е.М. Катасоновым разработана соответствующая классификация криогенных текстур для аллювиальных, делювиальных отложений и элювиальных образований. Определены критерии сингенеза, при котором происходят одновременно формирование отложений и промерзание. Им выделены различные типы сингенетических отложений, установлена тесная связь криогенного строения с генезисом вмещающих отложений и доказана возможность его использования для палеогеографии [*Катасонов, 2009*].

К сожалению, мерзлотно-фациальный анализ не стал универсальным методом исследования в геокриологии. Одной из причин этого являлась детерминистская позиция, увязывающая криогенное строение с существующими поверхностными условиями накопления и промерзания осадков. При этом наибольшее значение придавалось условиям, когда "льды образуются в отложениях, которые не вышли из-под воздействия среды их накопления и как самостоятельная толща продолжают формироваться в определенных мерзлотно-геологических условиях..." [*Попов, Катасонов, 1975, с. 56*]. Данное положение сужает применение мерзлотно-фациального анализа, исключая из него эпигенетически сформировавшиеся мерзлые толщи. На наш взгляд, это искусственное ограничение обусловлено недостаточной изученностью процесса эпигенетического криогенеза. В отличие от сингенеза, который реализуется в условиях сезонных циклов осадконакопления–промерзания, эпигенез является однонаправленным и стадийным. Промерзание уже сформировавшихся пород сопровождается последовательным изменением комплекса криогенных процессов и соответствующих ледяных образований. Подземные льды и вмещающие их породы являются взаимосвязанными когерентными подсистемами, формирующими геосистему более высокого ранга – мерзлые породы [*Гасанов, 1981*]. Структурно-текстурные особенности ледяных образований отражают индивидуальные особенности промерзания горной породы и могут быть использованы при палеомерзлотных реконструкциях. Поэтому эпигенетические мерзлые толщи также можно типизировать и выделить в них характерные черты криотекстур.

От мерзлотно-фациального к мерзлотно-формационному анализу. Мерзлые толщи являются не только разнофациальными, но и полигенетическими, если рассматриваются геологические формации. Классификацию их можно свести к трем уровням организации геологических тел: фация, генетический тип, формация. Г.Ф. Крашенинников в работе "Фации, генетические типы и формации" дает такое определение данным уровням: *фация* – геологическое тело, представленное одной или несколькими породами, образовавшимися в одной физико-географической обстановке, отличной от обстановки образования соседних одновозрастных пород; *генетический тип* – геологическое тело, представляющее собой комплекс генетически связанных фаций, возникших в одной ландшафтной обстановке (на суше или на дне моря) и большей частью под влиянием одного ведущего процесса; *формация* – геологическое тело, представленное комплексом генетических типов отложений, парагенетически тесно связанных друг с другом и образовавшихся в единой тектонической и(или) климатической обстановке [*Крашенинников, 1962*]. Существенно, что для каждого уровня организации распределение структурных элементов не случайно, они образуют парагенезы ("пара" – возле, у, при; "генезис" – происхождение – совместное нахождение, возникающее в результате одновременного или последовательного образования). В.С. Конищев приводит следующую формулировку парагенезов различных уровней организации геологической среды: "Фации являются парагенезами пород, генетические типы отложений – парагенезами фаций, а формации – парагенезами генетических типов отложений" [*2005, с. 3*]. Близкую формулировку дает В.Е. Хаин: "формация (геоформация) – это закономерное и устойчивое сочетание (парагенез) определенных генетических типов горных пород, связанных общ-

ностью (близостью) условий образования и возникающих на определенных стадиях развития основных структурных элементов земной коры" [*1995, с. 247*].

На наш взгляд, положения о парагенезе и иерархическом строении геологической среды применимо и к мерзлым породам, поскольку ледяные образования создают парагенезы с вмещающими породами. По мере перехода от таксонов низкого ранга к таксонам более высокого ранга необходимо проводить типизацию частных показателей в виде обобщенных характеристик пород. На этом принципе разработана модель криолитозоны как совокупности иерархически организованных криогенных геосистем [*Мельников, 2010; Хименков, 2013*].

При изучении закономерностей формирования мерзлых пород геокриология фактически остановилась на уровне мерзлотно-фациального анализа. Необходимо идти дальше, переходить к разработке мерзлотно-формационного анализа, объектом которого будут не только отдельная криогенная фация, но и совокупность фаций – криогенный генетический тип, а также их совокупность – криогенная формация.

КРИОСТРАТИГРАФИЯ

Стратиграфия (от лат. stratum – слой и греч. grapho – пишу) – раздел геологии, изучающий последовательность формирования комплексов горных пород в разрезе земной коры и первичные их соотношения в пространстве [*Международный... справочник..., 2002*]. Предложены и в разной степени используются различные виды стратиграфий – биостратиграфия, магнитостратиграфия, педостратиграфия, а в нашем случае и криостратиграфия. По мнению С.В. Мейена, этот терминологический поток косвенно вызывает снижение интереса к теории, что неизбежно ведет к противоположной крайности – чрезмерному упрощению. Действительно, для выделения слоев можно использовать любой признак или сочетание признаков, что и является причиной возникновения различных "стратиграфий". А стратиграфические признаки пород должны служить для определения именно пространственно-временных отношений геологических тел в литосфере. При этом определение границ всегда затруднено из-за широкого развития скрытых перерывов [*Мейен, 1974*]. Задача еще более усложняется, если необходимо различить первичные и вторичные образования. Например, подземные льды являются вторичными образованиями по отношению к вмещающим их породам, этим во многом обусловлены трудности, возникающие при попытке использования подземных льдов в качестве стратиграфического элемента.

Криостратиграфия, необходимость и возможность применения. А.И. Попов [*1965*] первым предложил оценивать подземный лед как критерий, который должен применяться при стратификации четвертичных отложений. Он положительно оценил принципиальную возможность использования подземного льда для региональной стратификации четвертичных отложений Яно-Индигирской низменности, а также других районов Севера и Северо-Востока СССР [*Попов, 1965*]. К сожалению, в дальнейшем эта идея ни в теоретическом, ни в методическом отношении разработана не была.

В последние годы в геокриологии резко возрос интерес к возможности использования методов стратиграфии при изучении многолетнемерзлых толщ. Появился и получил распространение термин "криостратиграфия" [*Васильчук, Васильчук, 2012; French, Shur, 2010*]. Казалось бы, можно только приветствовать широкое его использование в практике геокриологических исследований. Тем не менее применение данного понятия, на наш взгляд, пока нельзя считать научно обоснованным, поскольку не созданы теоретические основы криостратиграфии и не выработаны критерии определения криостратиграфических горизонтов. Наблюдается противоречие между необходимостью использования положений криостратиграфии и отсутствием ее методологических разработок.

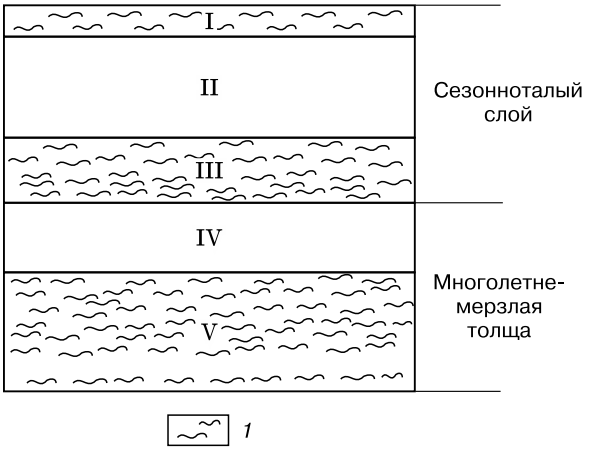
Следует отметить, что ни в одной из обобщающих монографий по геокриологии, изданных за последние десятилетия [*Попов, 1985; Уошборн, 1988; Романовский, 1993; Ершов, 2002*], понятие криостратиграфии не встречается, нет его и в геокриологических словарях [*Гляциологический словарь..., 1984; Мудров, 2007; Van Everdingen, 1998*]. Первыми данный термин использовали, по-видимому, Х. Френч и Ю. Шур в статье "The principles of cryostratigraphy" [*French, Shur, 2010*]. В ней под криостратиграфией понимается "исследование напластования мерзлых пород". В работе охарактеризованы текстурные особенности рассмотренных мерзлых толщ, предлагается возможная связь морфологии ледяных элементов с криогенными процессами. Высказанная позиция отражает мнение авторов, но не может быть основой для выделения стратотипа. Несомненно, распределение ледяных включений каким-то образом должно быть связано с историей формирования мерзлой толщи. По аналогии, например, с биостратиграфией криостратиграфия должна была бы по распределению и морфологии ледяных включений выявлять относительный возраст пород. Однако этого Х. Френч и Ю. Шур сделать не смогли. И это понятно, так как мерзлые толщи имеют, по существу, "два возраста": возраст самих отложений и возраст промерзания. В некоторых случаях тот и другой

возраст действительно совпадают (для сингенетических толщ). Кроме того, состояние мерзлых толщ, содержание в них льда и даже криогенные текстуры (последние – крайне медленно) изменяются во времени вследствие возможной миграции влаги в мерзлых толщах. Примером "стратиграфических" горизонтов может служить распределение ледяных включений в слое сезонного протаивания и кровле многолетнемерзлых пород, обусловленное не столько временем образования, сколько характером промерзания (см. рисунок). Можно ли в данном случае и можно ли в принципе по характеру криогенной текстуры судить о возрасте (относительном и абсолютном) промерзания? Если для сингенетических толщ определение относительного возраста очевидно (нижележащие слои старше вышележащих), то для эпигенетических мерзлых пород имеется обратная зависимость. А в случае формирования инъекционных льдов картина еще более усложняется.

Практика применения криостратиграфических подходов в геокриологии. Криостратиграфия еще не оформилась как самостоятельный раздел геокриологии, но мерзлотоведы используют частные методические подходы для расчленения и синхронизации мерзлых толщ. Прежде всего это стратиграфическое направление, характерное для всех геологических дисциплин, традиционное выделение горизонтов с применением литостратиграфического, биостратиграфического, хроностратиграфического методов. Развивается направление, базирующееся на изучении изотопного состава и спорово-пыльцевых спектров природных льдов.

Рассмотренные направления исследования ММП позволяют определить возраст пород и льдов, выявить тенденции изменения климата (похолодание, потепление), дать представление о палеоландшафтных условиях формирования мерзлых толщ. Таким образом, они позволяют оценить общие факторы, определяющие криогенез. Однако выявить пространственно-временную изменчивость комплексов криогенных процессов, формирующих мерзлые породы на какой-либо территории, пока не представляется возможным. Следовательно, и говорить об использовании криогенного строения пород в качестве идентификационного признака преждевременно.

Изучение структурно-текстурных особенностей ледяных образований наряду с другими методами должно входить в аппарат криостратиграфии. Благодаря работам П.А. Шумского, А.И. Попова, Е.М. Катасонова, Н.Н. Романовского, Т.Н. Жестковой, Б.И. Втюрина, Е.А. Втюриной и других была проведена морфологическая и генетическая типизация криогенных текстур, созданы методики их изучения, проанализированы региональные особенности распространения.



Упрощенная схема криогенного строения слоя сезонного протаивания (СТС) и кровли эпигенетической многолетнемерзлой толщи мелкодисперсных отложений.

I – верхняя часть СТС, повышенная льдистость которой обусловлена миграцией влаги к фазовой границе при промерзании сверху; II – иссушенная средняя часть СТС, служившая источником влаги для вышележащего и нижележащего слоев; III – нижняя, часто водонасыщенная часть СТС, повышенная льдистость которой связана с промерзанием СТС снизу; IV – "переходный слой" с пониженной льдистостью из-за периодического протаивания кровли мерзлоты в теплые годы; V – горизонт льдонакопления в кровле мерзлоты, обусловленного миграцией влаги в мерзлых породах как из СТС, так и из нижележащей мерзлой толщи вследствие существования градиента температуры; *1* – ледяные включения.

Дальнейшее развитие криостратиграфии связано с разработкой понятийного аппарата, методики криостратиграфических исследований, принципов выделения криостратотипов.

Ниже предложены к обсуждению некоторые базовые понятия криостратиграфии.

Понятийный аппарат криостратиграфии. Воспользуемся методом аналогий, применяя в качестве базовых понятий термины, принятые в стратиграфии [*Стратиграфический кодекс, 1992; Основы стратиграфии, 2009*]. *Криостратиграфия* – геокриологическая дисциплина, изучающая пространственные и временные соотношения криогенных образований горных пород криолитозоны. *Объектом изучения криостратиграфии* являются геологические тела, сложенные осадочными, вулканогенными и метаморфическими горными породами с присущим им распределением криогенных элементов (криогенного строения). *Элементарным объектом изучения* криостратиграфии является литологически однородный слой, отличающийся по вещественному составу и криогенному строению от ниже- и вышележащих слоев. Морфологическими модификациями слоя являются линзовидный пласт, линза, клин, покров,

залежь и т. д. В геокриологии данному элементарному объекту отвечает мерзлотная фация. Криостратиграфия включает не только элементарные объекты, но и их объединения – криостратиграфические подразделения, или криостратоны, составляющие определенное единство и обособленные по признакам, позволяющим установить их пространственно-временные соотношения. В геокриологии криостратону может соответствовать криогенная формация. Она включает комплекс парагенетически связанных друг с другом генетических типов отложений с присущими им криогенными образованиями, сформировавшимися в едином цикле промерзания.

В настоящее время не понятно, насколько морфология и морфометрия криогенных образований является системообразующей для криостратиграфии. Литогенную основу можно стратифицировать стандартными геологическими методами (литологическими, биологическими, геохронологическими). Частично это можно сделать и в отношении криогенной составляющей, т. е. подземных льдов, исследуя органический материал, химический и изотопный состав воды. Однако знаний о геологическом возрасте мерзлых пород и палеогеографических условиях периода их формирования для разработки криостратонов, а также территориальных и региональных криостратиграфических схем недостаточно. Для того чтобы выяснить историю формирования криогенного строения мерзлых толщ, необходимо установить связь между генезисом, составом, структурными особенностями пород с последовательностью процессов криогенеза. Обладает ли геокриология в настоящее время достаточным объемом знаний по данным вопросам? С уверенностью можно утверждать, что не обладает.

Возраст пород и возраст сформировавшейся в них мерзлоты могут значительно различаться. В сингенетических ММП их значения совпадают, а в эпигенетических могут различаться на миллионы лет. Формирование мерзлых пород происходит на фоне постоянно действующих экзогенных процессов; меандрирование русел рек, развитие термокарстовых озер с последующим дренированием приводят к локальному оттаиванию и повторному промерзанию талых участков. В результате в вертикальном разрезе криолитосферы, даже на одной территории, слои мерзлых пород представлены в разных сочетаниях, возраст осадков часто не совпадает с возрастом мерзлоты, а одновозрастные свиты могут представлять криогенные образования разного возраста [*Блинов и др., 2009*].

В геологии принят следующий алгоритм стратиграфического расчленения [*Основы стратиграфии, 2009*].

1. Выделение слоя (серии слоев).

2. Проведение литостратиграфического анализа слоя или серии слоев.

3. Проведение биостратиграфического анализа.

4. Проведение геохронологического анализа.

5. Определение стратиграфического элемента (слоя, серии слоев).

По аналогии для криостратиграфии можно предложить следующий алгоритм расчленения криогенной толщи.

1. Выделение слоя (серии слоев).

2. Проведение литостратиграфического анализа слоя или серии слоев.

3. Проведение биостратиграфического анализа.

4. Проведение геохронологического анализа.

5. Проведение структурно-текстурного анализа криогенного строения.

6. Определение криостратиграфического элемента (слоя, серии слоев).

7. Выделение криостратотипа.

В отличие от геологии в геокриологии до настоящего времени не проведено выделения криогенных стратотипов даже для небольших территорий в пределах пород одного генезиса. Не выделены типические криотекстуры с индивидуальными характеристиками для однородных фаций, не выполнен морфологический анализ криогенных образований, не определен разброс их морфометрических показателей. Тем более не проведены эти работы для уровня территорий и регионов. Очевидно, что на современном этапе развития геокриологии использовать понятие “криостратиграфия” можно, лишь оговаривая в каждом случае, что под ним подразумевается, и, конечно, не предполагая территориальных обобщений. Это вовсе не означает, что криостратиграфия не нужна, напротив, она крайне необходима для понимания особенностей формирования мерзлых пород на локальном, территориальном и региональном уровнях. Слабая разработанность положений криостратиграфии существенно тормозит развитие геокриологии, не позволяя анализировать пространственно-временные аспекты развития криолитозоны.

В принятой в геологии системе стратиграфического деления климатический фактор учитывается, и термин “крио” используется широко. В “Стратиграфическом кодексе” [*1992*] определено, что климатостратиграфические подразделения – это совокупности горных пород, признаки которых обусловлены периодическими изменениями климата, зафиксированными в особенностях вещественного состава пород и ассоциаций остатков организмов, преимущественно растительных, с учетом длительности формирования стратонов соответствующего ранга. Границами климатостратиграфических подразделений являются палеоклиматические рубежи, выраженные в изменении

литологического состава отложений, в смене ассоциаций организмов – климатических индикаторов, геохимической среды, седиментационных или диагенетических текстур и т. д. Основной таксономической единицей региональных климатостратиграфических подразделений является климатолит, представляющий собой совокупность горных пород, сформировавшихся во время одного климатического полуритма интенсивного похолодания (криомер) или потепления (термомер), проявленного в региональном масштабе. Каждому климатостратиграфическому подразделению должен соответствовать определенный стратотип или представительный разрез.

Криостратиграфия в геокриологическом смысле означает выделение стратотипических слоев мерзлых пород (слоев с близким криогенным строением), отражающих совокупность и чередование процессов криогенеза, определяющих распределение, морфологию и строение ледяных элементов. Криостратиграфическое расчленение мерзлых пород позволит создать местные, территориальные и региональные криостратиграфические стратотипы. В настоящее время геокриология еще далека от решения этих задач.

Отсутствие теоретических, методологических и прикладных положений криостратиграфии во многом связано со слабой разработкой некоторых базовых положений геокриологии, таких как: иерархическая организация криолитозоны, исследование морфологии и структуры области фазовых переходов, изучение формирования ледяных образований в реальных условиях, пространственно-временная изменчивость криогенной истории мерзлых пород, морфологический и морфометрический анализ криогенного строения различных генетических типов мерзлых отложений, роль поверхностных управляющих систем различного уровня в развитии многолетнемерзлых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние десятилетия развитие всех смежных по отношению к геокриологии наук (геологии, ландшафтоведения, геоморфологии, почвоведения и др.) связано с целенаправленным использованием системных представлений. В геокриологии эта тенденция не прослеживается. Авторы данной статьи уже несколько лет разрабатывают подход, который опирается на представление о криолитозоне как о совокупности самоорганизующихся иерархически организованных криогенных систем [*Хименков, 2006, 2013; Мельников, 2010*]. В соответствии с этим подходом в качестве объекта геокриологии выделяется криогенная геосистема (геологическое образование, соответствующее определенному уровню структурной организации геологической среды (геологическое тело, совокупность геологических тел)) вместе с соответствующей совокупностью ледяных включений, распределение, морфология и строение которых отражают историю перехода геологического объекта из немерзлого состояния в мерзлое.

Основным элементом геосистемных построений является элементарное геологическое тело – фация. Выбор фации в качестве базового элемента геосистемных построений обусловил необходимость рассмотрения материалов по различным компонентам литогенеза (аутигенез, диагенез, гипергенез) и соответствующих им криогенных аналогов (криоаутигенез, криодиагенез, криогипергенез).

В работе рассмотрена необходимость дополнения метода мерзлотно-фациального анализа, предложенного Е.М. Катасоновым, анализом эпикриогенных пород. Это позволит выявлять специфику формирования не только отдельных криолитогенных фаций, но и их парагенезов на более высоких уровнях организации криолитозоны: генетических типов как парагенезов фаций и территорий как парагенезов генетических типов. Данный подход мы определяем как метод мерзлотно-формационного анализа, который направлен на выявление пространственно-временных соотношений в развитии ММП различного генезиса.

В геокриологии до настоящего времени не разработаны собственные методы выделения стратотипических слоев мерзлых пород, связанные с анализом распределения и строения ледяных элементов; отсутствуют методики выделения локальных и региональных криостратотипов. Это в значительной мере тормозит развитие геокриологии, не позволяя проводить сравнительный анализ времени и условий образования мерзлых пород даже для небольших территорий. В статье сформулирована концепция методики стратиграфического расчленения мерзлых пород с использованием анализа их структурно-текстурных особенностей.

Применение системного подхода в геокриологии потребует доработки и уточнения многих существующих теоретических и методических положений геокриологии. Некоторые из рассмотренных проблем могут показаться отвлеченными, неактуальными или не решаемыми на современном уровне развития науки о мерзлых породах. Авторы считают, что только широкое обсуждение не решенных, но назревших вопросов, особенно касающихся фундаментальных положений науки, будет способствовать развитию геокриологии и преодолению наметившегося в ней кризиса. Обозначенные темы помогут при разработке новых направлений и методов исследования криолитозоны.

Литература

Блинов А.В., Беер Й., Тихомиров Д.А. и др. Датирование многолетнемерзлых пород с помощью космогенных радионуклидов (Сообщение 1) // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 3–15.

Брушков А.В. Засоленные мерзлые породы Арктического побережья, их происхождение и свойства / А.В. Брушков. М., Изд-во Моск. ун-та, 1998, 332 с.

Брушков А.В., Грива Г.И., Мельников В.П. и др. Реликтовые микроорганизмы криолитозоны как возможные объекты геронтологии // Успехи геронтологии, 2009, т. 22 (2), с. 253–258.

Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Пыльца и споры как индикатор генезиса пластовых льдов // Материалы X Междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 493–497.

Вассоевич Н.Б. О происхождении нефти (развитие органической теории от М.В. Ломоносова до наших дней) // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 1962, № 3, с. 10–30.

Гасанов Ш.Ш. Криолитологический анализ / Ш.Ш. Гасанов. М., Наука, 1981, 195 с.

Гляциологический словарь. Л., Гидрометеоиздат, 1984, 528 с.

Диагенез и катагенез осадочных образований / Под ред. Г. Ларсен, Дж.В. Чилингар: Пер. с англ. М., Мир, 1971, 463 с.

Ершов Э.Д. Общая геокриология: Учебник / Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.

Жемчужников Ю.А., Яблоков В.С., Боголюбова Л.И. и др. Строение и условия накопления основных угленосных свит и угольных пластов среднего карбона Донецкого бассейна // Тр. Геол. ин-та АН СССР. М., Изд-во АН СССР, 1959, ч. 1, вып. 15, 331 с.

Звягинцев Д.Г., Гиличинский Д.А., Благодатский С.А. Длительное сохранение микроорганизмов в постоянно мерзлых осадочных породах и погребенных почвах // Микробиология, 1985, т. 54, № 1, с. 155–161.

Катасонов Е.М. Криогенные текстуры, ледяные и земляные жилы как генетические признаки многолетнемерзлых четвертичных отложений // Вопросы криологии при изучении четвертичных отложений. М., Изд-во АН СССР, 1962, с. 37–44.

Катасонов Е.М. Литология мерзлых четвертичных отложений (криолитология) Янской приморской низменности / Е.М. Катасонов. М., ПНИИИС, 2009, 176 с.

Конищев В.С. Учение о геологических формациях: Учеб. пособие / В.С. Конищев. Минск, Изд-во Белорус. ун-та, 2005, 109 с.

Конищев В.Н., Рогов В.В. Влияние криогенеза на глинистые минералы // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 51–58.

Копелиович А.В. Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы / А.В. Копелиович. М., Наука, 1965, 312 с.

Крашенинников Г.Ф. Фации, генетические типы и формации // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1962, № 8, с. 3–13.

Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах / Б.А. Лебедев. Л., Недра, 1992, 239 с.

Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород с основами методики исследования / Н.В. Логвиненко. М., Высш. шк., 1984, 414 с.

Международный стратиграфический справочник: сокращенная версия. М., ГЕОС, 2002, 38 с.

Мейен С.В. Введение в теорию стратиграфии / С.В. Мейен. М., ГИН АН СССР, 1974, 113 с.

Мельников В.П. Криогенные геосистемы: проблемы исследования и моделирования / В.П. Мельников, А.Н. Хименков, А.В. Брушков и др. Новосибирск, Акад. изд-во "Гео", 2010, 390 с.

Мельников В.П., Геннадиник В.Б. Криософия – система представлений о холодном мире // Криосфера Земли, 2011, Т. XV, № 4, с. 3–8.

Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Основные понятия и определения / Ю.В. Мудров. М., Науч. мир, 2007, 316 с.

Основы стратиграфии: Учебно-метод. пособие. Ч. I / Сост. В.В. Силантьев, С.О. Зорина. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2009, 81 с.

Попов А.И. Подземный лед в четвертичных отложениях Яно-Индигирской низменности как генетический и стратиграфический индикатор // Основные проблемы изучения четвертичного периода. К VII Конгрессу INQUA (США, 1965). М., Наука, 1965, с. 278–285.

Попов А.И. Криолитология / А.И. Попов, Г.Э. Розенбаум, Н.В. Тумель. М., Изд-во Моск. ун-та, 1985, 239 с.

Попов А.И., Катасонов Е.М. Генезис, состав и строение мерзлых толщ и подземных льдов // Материалы II Междунар. конф. по мерзлотоведению: Докл. и выступления. Якутск, Кн. изд-во, 1975, вып. 8, с. 56–73.

Пустовалов Л.В. Петрография осадочных пород: Учеб. пособие. Ч. I / Л.В. Пустовалов. М., Гостоптехиздат, 1940, 476 с.

Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы: Учеб. пособие / Н.Н. Романовский. М., Изд-во Моск. ун-та, 1993, 336 с.

Стратиграфический кодекс. СПб., Изд-во ВСЕГЕИ по заказу МСК, 1992, 120 с.

Страхов Н.М. Основы теории литогенеза / Н.М. Страхов. М., Изд-во АН СССР, 1960, т. 1, 211 с.

Страхов Н.М., Логвиненко Н.В. О стадиях осадочного породообразования и их наименовании // Докл. АН СССР, 1959, т. 125, с. 389–392.

Тимофеев П.П. Геология и фации юрской угленосной формации Южной Сибири / П.П. Тимофеев. М., Наука, 1969, 459 с.

Тимофеев П.П. Проблемы литологии // Литология и полез. ископаемые, 1987, № 3, с. 3–13.

Трофимов В.Т., Васильчук Ю.К. Криогенетические типы отложений и толщ прибрежных аккумулятивных равнин Западно-Сибирской плиты // Криолитогенез в области прибрежных аккумулятивных равнин в связи с их нефтегазоносностью: Тез. семин. секции криолитогенеза Межвед. литол. комитета АН СССР (Ухта, 4–7 апр. 1988 г.). М., Изд-во Моск. ун-та, 1988, с. 49–51.

Уошборн А.Л. Мир холода. Геокриологические исследования / А.Л. Уошборн: Пер. с англ. М., Прогресс, 1988, 384 с.

Хаин В. Геотектоника с основами геодинамики / В. Хаин, М. Ломизе. М., Изд-во Моск. ун-та, 1995, 480 с.

Хименков А.Н. Введение в структурную криологию / А.Н. Хименков, А.В. Брушков. М., Наука, 2006, 279 с.

Хименков А.Н. Геосистемный подход в геокриологии // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 2, с. 74–82.

Ферсман А.Е. Очерки по минералогии и геохимии / А.Е. Ферсман. М., Наука, 1977, 192 с.

Япаскурт О.В. Литология / О.В. Япаскурт. М., Изд. центр Академия, 2008, 336 с.

French H., Shur Y. The principles of cryostratigraphy // Earth-Sci. Revs., 2010, vol. 101, p. 190–206.

Van Everdingen R. (ed.). Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. Boulder, CO, National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, 1998 (revised May 2005), URL: http://nsidc.org/fgdc/glossary/ (дата обращения: 10.10.2014).

Поступила в редакцию
13 ноября 2014 г.