

УДК 624.13:624.15

К ВОПРОСУ О СОЗДАНИИ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ С УЛУЧШЕННЫМИ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫМИ, ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КРИОГЕЛЕЙ

¹Дудникова С.А., ²Дудников В.Ю., ²Осадчая Г.Г.¹*Сосногорский газоперерабатывающий завод филиал ООО «Газпром переработка»,
Сосногорск, e-mail: kriogel@yandex.ru;*²*ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»,
Ухта, e-mail: vdudnikov@ugtu.net, galgriosa@yandex.ru*

Проведен обзор опыта использования криотропных композиций. Обозначена необходимость разработки составов криогелей с регулируемыми свойствами и технологии укрепления грунтов и оснований сооружений с их применением в зависимости от состава грунтов и внешних условий. Основной объем содержания статьи посвящен выявлению в Арктической зоне России природных ситуаций, связанных с разрушением поверхности, уменьшением устойчивости грунтов оснований, диктующих необходимость разработки новых материалов и их внедрения в практику с целью расширения возможностей по освоению и использованию арктических пространств и ресурсов. Даются рекомендации по использованию криогеля на территории криолитозоны для широкого спектра изменчивости мерзлотных инженерно-геологических условий (для скрепления пылеватых грунтов, для восстановления растительного покрова и обеспечения устойчивости пологих склонов, подверженных солифлюкционным процессам прибрежных территорий, легко подвергаемых размыву водой и эоловым процессам на незадернованных участках; для стабилизации сильнольдистых грунтов повсеместно развитых на Севере участков с подземными пластовыми и полигонально-жильными льдами; по стабилизации криогелями сильноувлажненных талых пучинистых грунтов котловин спущенных озер; на участках развития эрозионных (термоэрозионных) процессов, на участках активизации термокарста вдоль трасс линейных сооружений). Приводится оценка перспектив использования криогелей, в том числе с твердодисперсными нерастворимыми наполнителями (с зольным остатком установок плазменной утилизации мусора, а также с марками технического углерода, выпускаемого Сосногорским газоперерабатывающим заводом). Формулируются задачи, стоящие перед исследователями, решение которых будет способствовать расширению перечня направлений применения технологии криоструктурирования почвы.

Ключевые слова: криогель, криоструктурирование почвы, криолитозона, технический углерод (сажа)

TO THE QUESTION OF CREATION OF SOIL BASES WITH IMPROVED WATERPROOFING, THERMAL INSULATING AND MECHANICAL PROPERTIES BY APPLICATION OF POLYMER CRYOGELS

¹Dudnikova S.A., ²Dudnikov V.Yu., ²Osadchaya G.G.¹*Sosnogorsk gas processing plant of LLC «Gazprom Pererabotka», Sosnogorsk, e-mail: kriogel@yandex.ru;*²*Ukhta State Technical University, Ukhta, e-mail: vdudnikov@ugtu.net, galgriosa@yandex.ru*

A review of the experience of using cryotropic compositions is carried out. The need to develop cryogel compositions with adjustable properties and technology for strengthening soils and foundations of structures with their use, depending on the composition of soils and external conditions, is indicated. The main volume of the article is devoted to identifying natural situations in the Arctic zone of Russia associated with surface destruction, a decrease in the stability of foundation soils, which dictate the need to develop new materials and put them into practice in order to expand opportunities for the development and use of Arctic spaces and resources. Recommendations are given on the use of cryogel in the permafrost zone for a wide range of variability of permafrost engineering and geological conditions (for bonding silty soils, for restoring vegetation cover and ensuring the stability of gentle slopes subject to solifluction processes in coastal areas, which are easily exposed to erosion by water and aeolian processes in non-sodded areas; for stabilization of highly icy soils of ubiquitous developed in the North areas with underground stratal and polygonal-wedge ice; for stabilization with cryogels of highly moistened thawed heaving soils of depressions of drained lakes; in areas of development of erosion (thermal erosion) processes, in areas of activation of thermokarst along the routes of linear structures). An assessment of the prospects for the use of cryogels, including those with solid-dispersed insoluble fillers (with the ash residue of plasma waste disposal plants, as well as with grades of carbon black produced by the Sosnogorsk gas processing plant) is given. The tasks facing researchers are formulated, the solution of which will contribute to the expansion of the list of areas of application of soil cryostructuring technology.

Keywords: cryogel, soil cryostructuring, cryolithozone, carbon black (soot)

В настоящее время отечественные исследователи сориентированы различными стратегиями развития страны на поиск инновационных решений, в том числе в области разработки новых составов ком-

позиционных материалов, которые будут способствовать созданию устойчивых оснований сооружений в районах криолитозоны. Укрепление (увеличением прочности оснований) участков с неравномерной осад-

кой и деформацией под воздействием нагрузок является актуальной проблемой [1; 2], а в силу того что применение криотропных композиций является перспективным направлением в закреплении подвижных грунтов, создание грунтовых оснований с улучшенными гидроизоляционными, теплоизоляционными и механическими свойствами применением полимерных криогелей является не менее актуальной задачей.

Целью исследования является выявление в Арктической зоне России природных ситуаций, связанных с разрушением поверхности, уменьшением устойчивости грунтов оснований и т.п., диктующих необходимость разработки новых материалов и их внедрения в практику с целью расширения возможностей по освоению и использованию арктических ресурсов и пространств, а также оценка перспектив использования криогеля различного состава и для различных мерзлотно-грунтовых условий.

*Опыт использования криогелей
и предложения по его расширению*

В настоящее время имеется опыт использования криотропных композиций, в том числе в нефтегазовом комплексе [3]. Однако этот опыт ограничен единичными случаями применения, причем и его нужно адаптировать для территорий перспективного освоения, в том числе криолитозоны. Так, например, в ПАО «Газпром» на Бованенково в 2016 г. был удачно проведен эксперимент по укреплению грунтов откосов и насыпей применением криогелей, кроме этого, известна технология укрепления устьев скважин на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов; озвучиваются предложения по использованию криогелей в околотрубном пространстве линейных объектов, а также для нагнетания в грунт оснований сооружений с целью создания опорной системы [1].

Предложения по использованию криогелей на объектах трубопроводного транспорта, расположенных в криолитозоне, видятся вполне уместными. При ведении производственной деятельности на данных территориях необходимо учитывать все потенциально опасные геологические процессы. Так, в северной тайге преобладает заболачивание, которое зачастую образует водные скопления вдоль трасс трубопроводов, разрушая их обвалование, что может привести к всплыванию объекта и отслоению тепло- и гидроизоляции. На этой территории встречаются бугры пучения, особенно

в торфяниках. Зимой насыщенный влагой грунт замерзает и увеличивается в объеме, а затем приподнимается в виде бугра, что приводит к деформации линейного объекта. Термокарст является типичным процессом для лесотундры, сопутствующим процессом здесь становится термоэрозия, приводящая к оголению трубопровода, эрозии, осадке свайных оснований и элементов транспортной системы. В тундре высокие деревья и кустарники встречаются только в речных долинах, снежный покров незначителен, и поэтому на повышенных поверхностях возникает широкое проявление процессов морозобойного растрескивания, а на низких уровнях появляются полигональные образования с ледяными жилами (пятна-медальоны, каменные полигоны). В связи с этим в летний период времени развивается термоэрозия, которая формирует овражную сеть на участках примыкания к долинам рек и ручьев. При оттаивании жил развиваются обводненные термокарстовые канавы вдоль трубопровода. Это способствует боковой речной эрозии и озерной эрозии. Как следствие, происходит разрушение обвалования, изменение напряженно-деформированного состояния и деформация объекта.

Сегодня для выявления общих зональных и региональных предпосылок использования криогелей в криолитозоне часто имеется достаточная информационная база:

- система ландшафтной дифференциации региона;
- репрезентативные урочища для каждой геокриологической подзоны;
- основные геолого-геокриологические характеристики приповерхностных отложений этих урочищ;
- морфологические характеристики региональных ландшафтов для каждой геокриологической подзоны.

На основе этой базы знаний специалистами для широкого спектра изменчивости мерзлотных инженерно-геологических условий даются рекомендации по использованию криогеля на территории криолитозоны, в том числе и представленные в таблице и далее.

Информация о морфологической структуре ландшафтов региона позволяет оценить, в какой степени в том или ином ландшафте определенной природной зоны/подзоны возможно применение криогелей. Для удобства предлагается использовать индекс, обозначающий потенциал применения криогелей (ППК). ППК равен частному от деления площади той части ландшафта,

на которой целесообразно применять криогели для решения конкретных проблем, возникающих при освоении криолитозоны (Скр), на общую площадь этого ландшафта (Сланд):

$$\text{ППК} = \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{ланд}}} \cdot 100, \%$$

Рассмотрим в общем виде природные ситуации, предполагающие использование криогелей.

Проблема *стабилизации грунтовых оснований объектов, повышения их несущей способности*, а также в целом улучшение инженерной защиты производственных объектов в области развития ММП, с территориальной точки зрения напрямую увязана с площадями, занятыми ММП.

Для криолитозоны характерен широкий набор экзогенных процессов, развитие которых может привести к деструкции как технических сооружений, так и (локально) природных экосистем.

Рекомендации по использованию криогеля на территории криолитозоны для широкого спектра изменчивости мерзлотных инженерно-геологических условий [4]

№ п/п	Характер приповерхностных грунтов участков развития многолетнемерзлых пород (ММП)	Географическая приуроченность экзогенного процесса
1	Характерные для прибрежных территорий Севера пылеватые пески	
2	Сильнольдистые грунты участков с подземными полигонально-жильными и пластовыми льдами	
3	Талые сильноувлажненные пучинистые грунты котловин хасыреев	

Окончание таблицы		
№ п/п	Характер приповерхностных грунтов участков развития многолетнемерзлых пород (ММП)	Географическая приуроченность экзогенного процесса
4	Участки развития термоэрозионных процессов при подземной прокладке объектов трубопроводного транспорта	

Эрозионные процессы в наибольшем масштабе развиваются в песчаных грунтах и отмечены главным образом на участках переходов линейных сооружений (главным образом трубопроводов) через водотоки. При подземной или наземной прокладке трубопроводов эрозия может развиваться также в дисперсных грунтах на склоновых участках водоразделов. Такая проблема характерна для южной криолитозоны.

К участкам развития с поверхности песков относятся и другие процессы. Наиболее значимая среди них – *дефляция*, которая развивается в природных условиях, но активизируется также и в результате техногенного нарушения поверхности. Она характерна для плоских участков урочищ, сложенных с поверхности песками, и для приривочных частей террас.

Развитие *термокарстовых процессов* приурочено преимущественно к северной криолитозоне и характерно для участков, сложенных с поверхности торфом, то есть к высокольдистым грунтам. Максимальная степень потенциального развития термокарста характерна для полигональных торфяников, где развиты полигонально-жильные льды.

Необходимо отметить, что использование криогелей для стабилизации поверхностей с развитием термокарста еще требует своего изучения.

Потенциал развития *солифлюкции* часто, например в Большеземельской тундре, не очень высок. Солифлюкционные процессы фиксируются в основном в тундре на участках пологих склонов, сложенных с поверхности тиксотропными суглинками. Следует отметить, что ППК для солифлюкции сильно отличается от реальных пло-

щадей её развития. Однако, учитывая положительный климатический тренд, можно ожидать увеличение глубины сезонно-талого слоя, что спровоцирует более широкое проявление солифлюкционных процессов. Техногенное воздействие, ведущее к нарушению целостности мохово-растительного покрова, тоже может стать толчком к развитию этого процесса.

Возможности стабилизации *процессов пучения* с применением криогелей еще недостаточно изучены. В любом случае многолетнее пучение в разной степени развивается в торфяных грунтах в центральной и южной частях криолитозоны. Площади многолетнего пучения приурочены, главным образом, к некоторым урочищам болот и выпуклобугристым торфяникам, в основном характерны для южной криолитозоны. В северной криолитозоне, кроме выпуклобугристых торфяников, пучение наблюдается в пределах хасыреев.

Проблемы оптимизации *фильтрационных свойств грунтов природно-технических систем, а также формирования теплоизоляционного экрана* возникают практически повсеместно. Они актуальны в любых типах ММП (теплоизоляционный экран) при размещении объектов наземно или подземно, а также когда криогели позволяют создать дополнительный барьер безопасности как в талых, так и в ММП, например при обустройстве различных природоохранительных сооружений.

При организации и проведении *рекультивационных мероприятий* применение криогелей целесообразно при развитии с поверхности пылеватых грунтов (чаще суглинков) или песков. Криоструктурирование почвы может помочь адаптации

растений к климатическим условиям криолитозоны, удерживая влагу в засушливый период и защищая их от вымерзания в зимний [5]. Таким образом, из-за широкого развития пылеватых суглинков и песков практически для всех тундровых урочищ северной криолитозоны можно использовать криогели при проведении рекультивационных работ. В южной криолитозоне это целесообразно применять к участкам, сложенным с поверхности песками.

Оценка ландшафтно-территориального потенциала использования криогелей на примере территории Большеземельской тундры

Авторами статьи произведена оценка ландшафтно-территориального потенциала использования криогелей в Большеземельской тундре, результаты которой будут освещены в следующих публикациях, однако, предваряя их, отметим, что в зависимости от зональной принадлежности участка освоения диапазон применения криогелей и площадь возможного их использования – ППК – неодинаковы, а также, что для этой территории потенциал применения криогелей очень высок, причем с юга на север увеличиваются площади, применимость на которых криотропного гелеобразования видится более чем целесообразной. В ландшафтном отношении ППК для стабилизации, а также повышения несущей способности грунтовых оснований объектов имеет нечеткую тенденцию увеличения с понижением абсолютных отметок поверхности ландшафтов. Подобная тенденция выявлена для вариантов использования криогелей для предотвращения развития ряда экзогенных процессов (эрозия, пучение в южной криолитозоне, термокарст – за исключением тундры), для оптимизации фильтрационных свойств грунтов природно-технических систем (за исключением тундровой зоны), а для крайне северной тайги – и для формирования теплоизоляционного экрана, для рекультивации нарушенных участков в крайне северной тайге. Обратная тенденция выявлена для таких криогенных процессов, как солифлюкция, для рекультивации нарушенных участков в лесотундре и тундре.

Можно уверенно заявлять о широких перспективах применения криогелей в районах распространения ММП как для целей предотвращения и остановки деградации почв, рекультивации земель северных территорий, стабилизации и повышения несущей способности грунтовых оснований

объектов, так и для использования в качестве противотрационного, теплоизоляционного элемента природно-технических систем. Возможность использования композиционных материалов на основе криогеля как дополнительного барьера безопасности при обустройстве различных природоохранительных сооружений, предназначенных для сбора, обезвреживания и захоронения нефтесодержащих и прочих отходов, является не менее значимым направлением использования нового материала.

К вопросу о создании составов криотропных полимерных композиций с новыми регулируемыми свойствами, открывающих новые перспективы использования криогелей

Известно, что в настоящее время для решения проблемы отходов, особенно для отдаленных и труднодоступных районов, в которых невелика вероятность организации полноценных мусоросортировочных комплексов, активно внедряется термодеструкция как способ утилизации мусора. По этой теме не утихают споры экологов и операторов по обращению с твердыми коммунальными отходами, однако когда речь идет об использовании отечественного метода плазменной утилизации мусора, специалистами экологами поддерживается внедрение установок, в которых нет горения, а мусор подвергается газификации ионизированным газом температурой в несколько тысяч градусов. При такой температуре в зоне реактора не образуется вредный газ (нет горения и кислорода, поэтому нет условий для образования диоксинов, фуранов и пр.), отходы превращаются в золу, которую авторам видится перспективным использовать в качестве нерастворимого наполнителя самоупрочняющегося полимерного криогеля. Отметим, что свою заинтересованность в исследованиях с зольным остатком уже обозначили представители региональных операторов по обращению с твердыми коммунальными отходами.

Кроме этого, обращает на себя внимание исследование СО РАН по использованию в качестве наполнителя криогеля мелкодисперсного технического углерода (марок П 145, 161, 245, 514 и N339). Криогели созданного ими состава обладали «улучшенными эксплуатационными характеристиками, а именно, повышенной прочностью и гидрофобностью, которые, в свою очередь, зависят от морфологии технического углерода и функционального покро-

ва его поверхности» [5]. Вывод о том, что сильное влияние на прочностные характеристики углеродных суспензий оказывают морфологические параметры технического углерода, позволяет рассчитывать, что продолжение исследований с некоторыми уникальными марками техуглерода, выпускаемыми Сосногорским газоперерабатывающим заводом, могут дать достаточно интересный результат, а беспрецедентно высокий рН водной вытяжки, например, печной сажи также «сыграет» свою роль в экспериментах. Эксперименты, объединяющие интересы уникального заводского производства по поиску новых направлений использования, сбыта своей продукции и исследователей, еще только предстоят, однако использованием технического углерода в качестве нерастворимого наполнителя криогеля уже получен материал нового состава и функциональных свойств.

Придание криогелям гидрофобности свидетельствует о перспективности применения его в качестве гидроизолирующего материала. С учетом противифильтрационных свойств видится уместным его использование в качестве дополнительного барьера безопасности, например при обустройстве сооружений для сбора, обезвреживания и захоронения отходов. Для строительства противифильтрационных элементов гидротехнических сооружений и решения актуальнейшей проблемы современности в области мелиорации – большие потери воды из каналов и водоемов, 90% из которых происходят вследствие фильтрации из оросительной сети – однозначно могут быть рекомендованы композиционные криогели, содержащие технический углерод. Актуальность рекомендации подтверждается анализом «свежих» изданий по проблематике, который ожидаемо не выявил предложений по использованию криотропных композиций в качестве противифильтрационного мероприятия [6]. Видится, что как минимум в качестве дополнения к малонадежным (порывы и пр. нарушения целостности) пленочным противифильтрационным устройствам использование нового материала будет более чем уместно.

Выводы

1. Проведен обзор опыта использования криотропных композиций; отмечено, что опыт ограничен единичными случаями применения, причем и его нужно адаптировать для территорий перспективного освоения, в том числе криолитозоны.

2. Даются рекомендации по использованию криогеля на территории криолитозоны для широкого спектра изменчивости мерзлотных инженерно-геологических условий.

3. Обозначена необходимость разработки составов криотропных полимерных композиций с регулируемыми гидрофобными свойствами и технологии укрепления грунтов и оснований сооружений с применением криогелей в зависимости от состава грунтов и внешних условий.

4. Предлагается развить исследования томских коллег с твердодисперсными нерастворимыми наполнителями криогеля опытами с зольным остатком установок плазменной утилизации мусора, а также с уникальными марками печного техуглерода, выпускаемого Сосногорским ГПЗ.

Список литературы / References

1. Бурков П.В., Дудников В.Ю., Кочуров Б.И., Осадчая Г.Г. К вопросу о направлениях использования композиционных материалов на основе криогеля и методики криоструктурирования почвы в Арктической зоне России // Проблемы региональной экологии. 2020. № 1. С. 34–40.

Burkov P.V., Dudnikov V.Yu., Kochurov B.I., Osadchaya G.G. On the question of the directions of using composite materials based on cryogel and methods of cryostructuring soil in the Arctic zone of Russia // Problemy regional'noy ekologii. 2020. № 1. P. 34–40 (in Russian).

2. Минкин М.А. Техногенные геокриологические процессы на трассах магистральных трубопроводов // Природные опасности России. Геокриологические опасности. М.: Изд-во фирма «Крук», 2000. С. 158–163.

Minkin M.A. Technogenic geocryological processes on the routes of main pipelines // Prirodnyye opasnosti Rossii. Geokriologicheskiye opasnosti. M.: Izd-vo firma «Kruk», 2000. P. 158–163 (in Russian).

3. Манжай В.Н., Фуфаева М.С. Свойства криогелей и их применение в технологиях добычи и транспорта нефти // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2011. № 6. С. 104–109.

Manzhai V.N., Fufaeva M.S. Properties of cryogels and their application in technologies for oil production and transportation // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Neft' i gaz. 2011. № 6. P. 104–109 (in Russian).

4. Алтунина Л.К., Бурков П.В., Бурков В.П., Дудников В.Ю., Овсянникова В.С., Осадчая Г.Г., Фуфаева М.С. Применение криогелей для решения задач рационального природопользования и эксплуатации объектов магистральных трубопроводов в условиях Арктики России // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 2. С. 173–185.

Altunina L.K., Burkov P.V., Burkov V.P., Dudnikov V.Yu., Ovsyannikova V.S., Osadchaya G.G., Fufaeva M.S. Application of cryogels for solving problems of rational nature management and operation of trunk pipeline facilities in the Arctic of Russia // Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov. 2020. Vol. 10. № 2. P. 173–185 (in Russian).

5. Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Фуфаева М.С., Филатов Д.А., Овсянникова В.С. Криогели для защиты почв от дефляции и создание зеленого покрова // Северный регион: наука, образование, культура. 2015. Т. 2. № 2 (32). С. 216–221.

Altunina L.K., Svarovskaya L.I., Fufaeva M.S., Filatov D.A., Ovsyannikova V.S. Cryogels for soil protection from deflation and the creation of a green cover // Severnyy region: nauka, obrazovaniye, kul'tura. 2015. Vol. 2. № 2 (32). P. 216–221 (in Russian).

6. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Противифильтрационные покрытия из геосинтетических материалов: монография. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. 239 с.

Kosichenko Yu.M., Baev O.A. Anti-filtration coatings from geosynthetic materials: monografiya. Novocherkassk: RosNIIPM, 2014. 239 p. (in Russian).