



СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЫВЕТРИВАЕМЫХ ПОЧВ И СОЗДАНИЕ ЗЕЛЕННОГО ПОКРОВА ИЗ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ МЕТОДОМ КРИОСТРУКТУРИРОВАНИЯ

Л.К.Алтунина¹, Л. И. Сваровская^{1}, Т. Ган-Эрдэнэ², М. С. Фуфаева¹,
Д.А. Филатов¹, Ч. Батжаргал², М. Баяржаргал²*

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, Томск, пр-т Академический, 4
e-mail: sli@ipc.tsc.ru

²Институт химии и химической технологии Монгольской академии наук, Монголия, 13330, Улаанбаатар,
e-mail: t_ganerdene@yahoo.com

Аннотация. Исследовано, влияние криоструктурированной почвы, полученной с применением раствора поливинилового спирта методом замораживания-оттаивания, на жизнеспособность и ферментативную активность аборигенной почвенной микрофлоры, и рост многолетних трав. С применением криогеля в комплексе с многолетними травами предложен химико-биологический метод предотвращения эрозии почвы. Полимерная матрица криогеля в почве, с одной стороны, достаточно прочна, чтобы выдержать воздействие эрозионных процессов, с другой – достаточно эластична, чтобы не препятствовать росту растений. Семена прорастают сквозь криогелевый слой и образуют устойчивый зеленый покров. Криогели безвредны для людей и экологически безопасны для окружающей среды.

ВВЕДЕНИЕ Географические зоны, подверженные воздействию резко континентального климата (широкий диапазон сезонного колебания температур, малое количество осадков, выветривание и эрозия почв и т.д.), характеризуются, как правило, скудной растительностью и пыльными бурями. Обширные районы деградированных почв определены в Китае, Монголии, России, Казахстане, Туркменистане, Пакистане, Непале и др. Каждый год опустынивание и засуха приводят к потерям сельскохозяйственной

продукции ориентировочно на сумму в 42 млрд. долларов США [1].

Общая площадь почв России, подверженных процессам опустынивания или потенциально опасных в этом отношении, составляет по различным оценкам от 50 до 100 млн. га. Это районы Поволжья, Сибири, Забайкалья, Калмыкии и Астраханской области [2]. В Монголии под угрозой опустынивания находится более 80 % территории. Ситуацию усугубляет также антропогенный фактор. Возрастающее опустынивание территорий представляет собой глобальную проблему, имеющую не только экологическую, но и ярко выраженную социально-экономическую направленность.

Для закрепления подвижных грунтов разработаны механические, химические и биологические способы. Одним из механических способов борьбы с движением песчаных масс и стабилизации кочующих дюн является покрытие почвы «соломенными циновками в шахматном порядке» (Китай, Туркменистан). Этот метод широко используется для защиты железнодорожного полотна и автомобильных дорог от заноса песком. В некоторых районах широкое использование в целях борьбы с передвижением песчаных масс находят такие материалы, как глина, галька и прочие материалы [3]. При химической защите используют полимеры и битумные смеси, т. е. вещества,



которые образуют на поверхности пленку «склеенных» частичек грунта [4].

Биологический способ закрепления песков заключается в посадке (посеве) кустарниковых и древесных пород или трав. Надежным средством закрепления почвы являются многолетние травы. Густой травяной покров прочно удерживает почву, скрепляя ее корнями, словно арматурой. Но применение биологических методов защиты для создания противозерозионного эффекта и благоприятных по влажности и температуре стартовых условий для прорастания и укоренения дернообразующих трав обычно решается в комплексе с техническими средствами. Посеянные семена уносятся ветром, а песчаные грунты быстро высыхают и теряют влагу, необходимую для растений.

Наиболее перспективным направлением представляется комбинация химического и биологического способов защиты деградированных почв. С этой целью может быть использована технология её криоструктурирования с применением водных растворов поливинилового спирта (ПВС). Растворы ПВС после цикла замораживания – оттаивания переходят из вязкотекучего состояния в упругие полимерные тела, способные к большим обратимым деформациям [5].

Криогели на основе ПВС образуются в условиях кристаллизации растворителя (для воды при температуре ниже 0°C). Температура их плавления превышает $+70^{\circ}\text{C}$. Механические и теплофизические свойства криогелей ПВС зависят от состава и концентрации компонентов исходного раствора, а также от режимов и способов криогенной обработки исходных растворов. Увеличение числа циклов замораживания – оттаивания приводят к упрочнению криогеля [6]. Вследствие экологической безвредности и нетоксичности, криогели нашли широкое применение в пищевой промышленности, медицине и биотехнологиях, [7].

Сотрудниками Института химии

нефти СО РАН совместно с монгольскими специалистами из института химии и химических технологий МАН разработан метод получения полимерной матрицы криогеля на основе ПВС с высокой адгезией к песку, глине и т.д. [8, 9]. Твердые и мелкодисперсные ингредиенты грунта могут быть связаны в наполненные криоструктураты, практически неподверженные ветровой эрозии. Преимуществом разрабатываемого метода является комплексный подход к решению проблемы опустынивания почв, основанной на применении криогелей в комплексе с многолетними травами.

Цель работы - Разработать методику предотвращения эрозии почвы методом криоструктурирования в комплексе с многолетними травами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях исследован образец поливинилового спирта (ПВС) со средней молекулярной массой $M = 75000$ и характеристической вязкостью его водных растворов $\eta = 0,56$ дл/г.

Для получения 5 %-ного водного раствора ПВС 50 г сухого порошка полимера пропитывали способом капиллярной фильтрации водой (950 мл) при нагревании на водяной бане при температуре $70 - 90^{\circ}\text{C}$ с перемешиванием до полного растворения полимера. Полученный раствор ПВС охлаждали, взвешивали, доливали испарившийся растворитель и хранили при комнатной температуре в закрытой ёмкости. Перед использованием полимерного раствора, после длительного хранения, для дезагрегации образовавшихся агломератов криогелей его снова подогревали с перемешиванием до температуры 50°C .

Вязкость водных растворов ПВС измеряли на ротационном вискозиметре при температуре 30°C и интервале скоростей сдвига (γ) от 3 до 1312 c^{-1} .

Для формирования криогелей водный раствор ПВС в концентрации 5



мас.% заливали по 10 мл в металлические ячейки с внутренним диаметром 10 мм, высотой 28 мм и замораживали при $T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 часов. Твердые ледяные образцы размораживали в течение 4 часов при комнатной температуре ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) со скоростью $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. При 3-4-х кратном замораживании-оттаивании получали упругие криогели.

Для получения криогелей, наполненных почвой, водный раствор ПВС (5 мас. %) смешивали с просеянной почвой в соотношении 1:7. Эксперименты проводили с лесной дерново-подзолистой почвой. После тщательного перемешивания большую часть полученной массы переносили в пластмассовые емкости, площадь поверхности которых 1 м^2 . Сверху высевали семена клевера ползучего (*Trifolium repens*) и семена газонной травы (*Deshampsia caespitosa*, сорт «баркамсия»). Затем почву в емкостях покрывали тонким слоем оставшейся массы (почва/раствор ПВС). После цикла замораживания-размораживания получали криоструктурированную почву.

Численность естественной почвенной микрофлоры изучали на примере гетеротрофных бактерий участвующих в создании почвенного плодородия. Их численность определяли методом посева на мясо-пептонный агар в чашках Петри [10]. Количество клеток пересчитывали на грамм почвы с учетом влажности.

Каталазную почвенную активность определяли газометрическим методом, основанным на измерении скорости разложения перекиси водорода при ее взаимодействии с почвой. Активность каталазы выражали в мл кислорода, выделившегося на 1 г почвы [11].

Через каждые 2-3 суток отбирали пробы почвы для определения численности микроорганизмов и каталазной почвенной активности.

Измерения газообмена у сеянцев проводили один раз в месяц с

помощью портативного инфракрасного газоанализатора «Li-Cor 6400» (Li-Cor, США). Эффективность использования воды рассчитывали, как отношение скорости фотосинтеза к транспирации и выражали в $\text{мкмоль CO}_2/\text{милмоль H}_2\text{O}$ [12].

В конце эксперимента определяли сухую массу надземной и подземной части исследуемых растений гравиметрическим методом. Перед этим растения освобождали от частичек почвы и сушили в шкафу при температуре $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении 2 суток до постоянного веса [13].

Эксперименты повторяли три раза. Повторность измерений в экспериментах пятикратная. Обработку результатов осуществляли с помощью статистического пакета Excel (MS office 2003).

Схема эксперимента:

- Контроль 1 Почва+семена газонной травы (П+ГТ);
- Опыт 1 Почва+ криогель+семена газонной травы (П+Кр+ГТ);
- Контроль 2 Почва+клевер (П+Кл);
- Опыт 2 Почва+криогель+клевер (П+Кр+Кл);

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации оптимального способа получения криогелей исследовали молекулярные характеристики и реологические особенности поведения исходных растворов поливинилового спирта. При изучении вязких свойств растворов ПВС с концентраций 1 – 10 % масс выявлено, что криогель образуется в процессе замораживания при концентрации полимера не ниже 5 %. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют, что в исходных растворах с такой концентрацией уже существует сплошная флуктуационная сетка из взаимно перепутанных макромолекул, наличие которой подтверждается проявлением в них эффекта Вайссенберга [9]. В экспериментах была взята минимальная



5%-ная концентрация полимера.

Данные по определению модуля упругости двухкомпонентных (ПВС + вода) и трехкомпонентных (ПВС+вода+почва) криогелей представлены на рисунке 1. Из рисунка следует, что введение в полимерную матрицу твердых частиц почвы многократно повышает жесткость криогелей. Модуль упругости возрастает с увеличением числа циклов замораживания-размораживания. Наибольшее увеличение модуля упругости криогелей происходит после первых 2 – 4-х циклов замораживания – размораживания. В результате первого замораживания кристаллизация воды и образование льда протекают в концентрированном растворе ПВС. Начиная со второго цикла криогенного воздействия и в последующих замораживается не раствор, кристаллизация растворителя происходит уже в массе криогеля, сформированного после первого цикла замораживания-оттаивания.

В таблице 1 приведены значения модуля упругости (G , кПа) и коэффициента теплопроводности (λ , Вт/(К·м)) после первого цикла замораживания-оттаивания. Полученные данные показали, что модуль упругости криогелей (G) с добавлением почвы в 8.5 раз больше по сравнению с двухкомпонентным криогелем, т.е. частички почвы прочно склеиваются, что важно при разработке способа борьбы с процессом эрозии или выветривания.

Коэффициенты теплопроводности (λ Вт/(К·м)) воды, влажной и криоструктурированной почвы составляют 0.63, 0.45 и 0.34 (табл.1). Прослойки полимерной матрицы между мелкодисперсными частицами наполнителя (почвы) выполняют "демпфирующую" функцию и снижают теплопроводность криогеля наполненного почвой почти на 50% по сравнению с водой и на 25 % по сравнению с влажной почвой. Таким образом, в зимний период почва с криогелем меньше вымораживаться по сравнению с обычной почвой. Вследствие чего

повышается вероятность того, что корневая система растений лучше перенесет период низких температур.

Жизнедеятельность почвенной микрофлоры и прорастание семян в криоструктурированной почве.

С жизнедеятельностью почвенной микрофлоры связаны многие протекающие в почве процессы, в первую очередь – круговорот биогенных элементов, утилизация органических и минеральных соединений, синтез ферментов, витаминов, аминокислот, ауксинов и хелатов, играющих значительную роль в процессах повышения плодородия почвы и питания растений.

Результаты опытов показали, что криогель введенный в почву в качестве криоструктурата стимулирует процессы роста и развития почвенной микрофлоры. На рисунке 2 представлена кинетика роста аммонифицирующих бактерий в контрольной почве и с добавлением криогеля. Исходная численность исследуемых микроорганизмов определялась в интервале $40-60 \cdot 10^3$ КОЕ/г почвы. В опытных вариантах по ходу эксперимента численность микроорганизмов превышала контрольные данные в 1.5-3 раза (рис.2).

Исследование ферментативной активности почв с криогелем показало, что активность каталазы на протяжении всего эксперимента остаётся почти на уровне контроля, но в определенные интервалы времени превышает контрольные данные на 3-7 %. Это связано с тем, что криогель в почве удерживает влагу и в период высоких среднесуточных температур почва будет меньше высыхать, тем самым повышая жизнедеятельность микрофлоры, ее ферментативную активность и выживаемость посаженных растений. Семена газонной травы и клевера проросли одновременно в контрольной и криоструктурированной почве на 6-е и 2-е сутки соответственно. Но в почве наполненной криогелем, всхожесть семян на 7-9 % превышает контрольные



данные (табл. 2).

Сухая масса надземной части растений в конце эксперимента на 4-5 % выше в почве с криогелем в сравнении с контролем. В опытном варианте сухая масса корневой системы клевера и газонной травы также на 4.5-5.5 % превышает массу корневой системы растений (табл. 2).

Одним из наиболее часто используемых параметров, который, как полагают некоторые исследователи, коррелирует с продуктивностью, это интенсивность видимого фотосинтеза [14]. Скорость фотосинтеза быстро реагирует на изменение внешних условий и отражает состояние растения на всех стадиях онтогенеза. Проведенные исследования показали достоверные различия между вариантами по интенсивности фотосинтеза и транспирации. Оба показателя при первом измерении были выше у клевера, выращенного на почве с криогелем (табл.3).

При втором измерении интенсивность фотосинтеза у контрольного образца осталась прежней, а у образца, выращенного с использованием криогеля, возросла в 1,6 раза. Интенсивность транспирации при втором измерении у обоих вариантов практически одинакова. Эффективность использования воды растениями, выращенными на криоструктурированной почве при первом и втором измерении была выше на 20 и 260 % соответственно. Следовательно, растения, выращенные на криоструктурированной почве обладают более высокой адаптивностью по сравнению с контролем.

Таким образом, введение в почву криогеля стимулирует ферментативную активность почвенной микрофлоры и процессы всхожести, фотосинтеза, и адаптивности растений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод получения полимерной матрицы криогеля на основе ПВС с высокой адгезией к почве и грунту. Твердые

и мелкодисперсные ингредиенты грунта связываются в наполненные прочные крио-структураты.

Модуль упругости криогелей (G, кПа) с добавлением почвы в 8.5 раз выше по сравнению с двухкомпонентным криогелем, состоящим из воды и полимера, т.е. частички почвы прочно склеиваются, что важно при разработке способа борьбы с процессам эрозии или выветривания.

Коэффициент теплопроводности (λ , Вт/(К·м)) криоструктурированной почвы на 25 % ниже по сравнению с обычной влажной почвой, что повышает выживаемость корневой системы растений в период низких температур.

Криогель в почве не оказывает негативного влияния на аборигенную почвенную микрофлору и на каталазную активность почвы. Максимальная численность микроорганизмов на определенные сутки в 1,5-3 раза превышает контрольные данные.

Каталазная активность почвы с криогелем на 3-7 % выше обычной почвы. Исследование биометрических данных растений, выращенных в криоструктурированной почве, показало их более высокую адаптивность по сравнению с контрольными образцами.

Таким образом, разработана методика для удерживания почвы и семян растений в криоструктурированной почве (подана заявка на патент). Семена прорастают сквозь криогелевый слой и образуют устойчивый зеленый покров, что важно для климатических зон, где растительность практически отсутствует и возможна эрозия почвы.

Криогели безвредны для людей и экологически безопасны для окружающей среды. Их можно готовить на месте непосредственного применения с использованием стандартной техники.

Планируется проведение опытно-промышленных экспериментов на территориях России и Монголии.



Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта № 14 Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институт химии нефти

СО РАН и государственным бюджетным учреждением Институт химии и химических технологий МАН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *В. А. Ковда.* Проблемы опустынивания и засоления почв аридных регионов мира. М.: Изво Наука. 2008. 415 с.
2. *Добровольский Г.В.* Деградация и охрана почв. М.: Изд-во МГУ, 2002. 654 с.
3. *Елисеев А.В., Чеверев В.Г.* Метод защиты дисперсных грунтов от эрозии // Криосфера земли. 2008. Т.8. №3. С. 36-40.
4. *Елисеев А.В.* Комплексование методов для защиты территории от эрозионных процессов // Промышленное и гражданское строительство. 2007. №9. С. 48-54.
5. *В.И. Лозинский.* Криотропное гелеобразование растворов поливинилового спирта // Успехи химии. 1998. Т.67. № 7. С. 641-655.
6. *В.И. Лозинский, Л.Г. Дамикалн, И.Н. Курочкин, И.И. Курочкин.* Изучение криоструктурирования полимерных систем. Физико-химические свойства и морфология криогелей поливинилового спирта, сформированных многократным замораживанием-оттаиванием. // Коллоидный журнал. 2008. Т. 70. № 2. С. 212 - 222.
7. *В.И. Лозинский.* Криогели на основе природных и синтетических полимеров: получение свойства и области применения // Успехи химии. 2002. Т.71. № 6. С. 559-585.
8. *Л. К. Алтунина, В.А. Кувишинов, С.Н. Долгих.* Криогели для тампонажных работ в районах распространения многолетнемерзлых пород // Гидротехника. 2010. № 3. С. 56 – 60.
9. *Алтунина Л.К., Манжай В.Н., Фуфаева М.С.* Механические и теплофизические свойства криогелей и пенокриогелей, полученных из водных растворов поливинилового спирта // Журнал прикладной химии. 2006. Т.79. №10. С.1689 - 1692.
10. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
11. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. М.: Изд-во Наука, 2005. 252 с.
12. *Sinclair T. R., Tanner C. B., Bennett J. M.* Water-Use Efficiency in Crop Production // BioScience. 1984. Vol. 34. №. 1. P. 36-40.
13. *Blum A.* Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? // Australian Journal of Agricultural Research. 2005. № 56. P. 1159–1168.
14. *Чиков В.И.* Эволюция представлений о связи фотосинтеза с продуктивностью растений // Физиология растений. 2008. Т. 55. №1. С. 140-154.

Подписи к рисункам

Рисунок 1 – Влияние циклов замораживания-размораживания на упругие свойства криогелей: 1 – раствор ПВС (5 мас. %) с почвой в соотношении 1:7; 2 – водный раствор ПВС 5 мас. %.

Рисунок 2 – Динамика численности гетеротрофных бактерий в почве с криогелем и семенами газонной травы (а), семенами клевера ползучего (б)

Рис. 1. Алтунина и др.

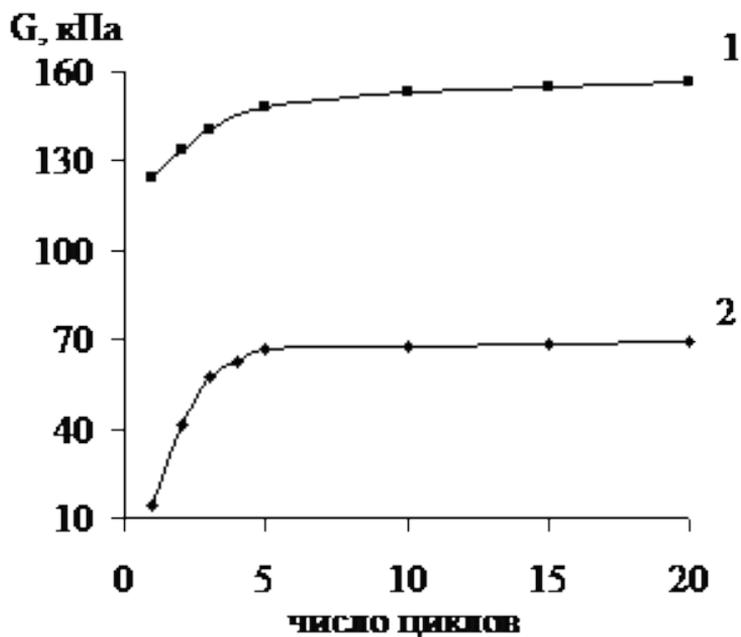
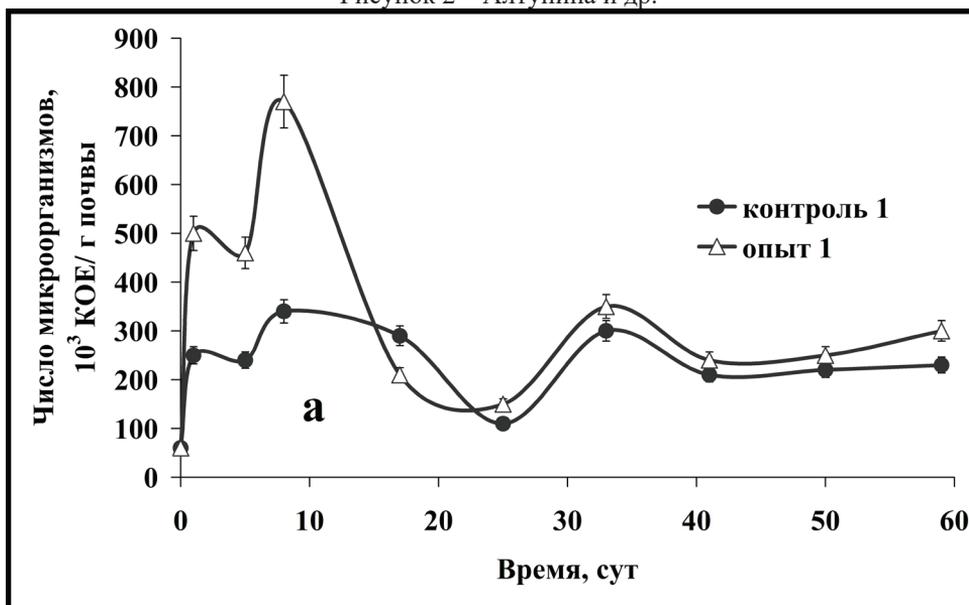


Рисунок 2 – Алтунина и др.



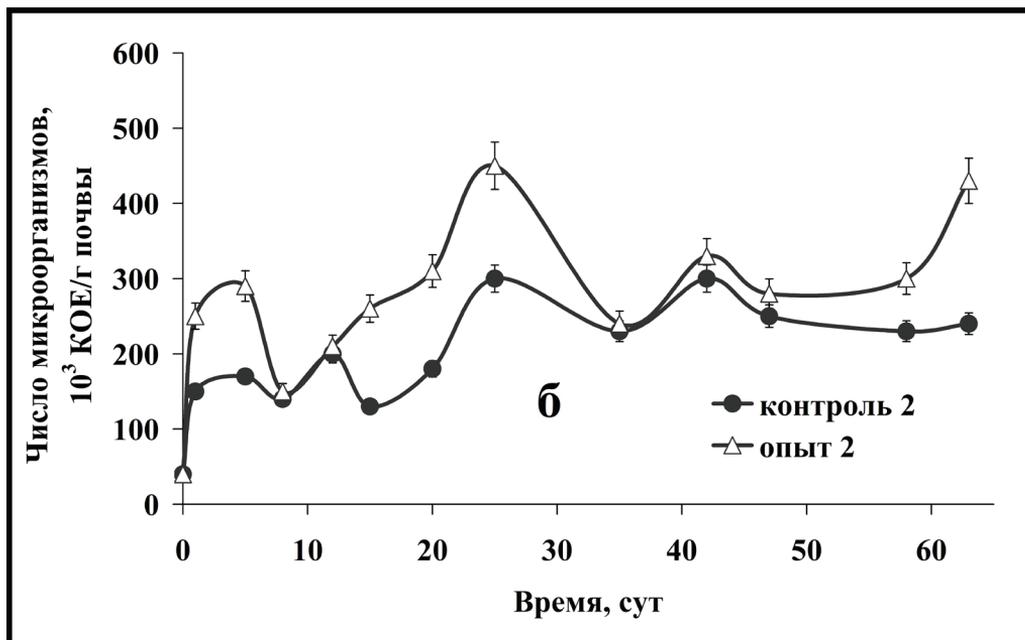


Таблица 1

Механические и теплофизические свойства криогелей

№	Состав, мас. %	Свойства криогелей	
		Модуль упругости G, кПа	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(К·м)
1	Воздух	-	0.03±0.001
2	Вода	-	0.63±0.01
3	Почва (сухая)	-	0.14±0.02
4	Почва влажная (влажность 30%)	-	0.45±0.02
5	ПВС 5 % (раствор)	-	0.42±0.01
6	ПВС 5 % (криогель)	14.5±0.5	0.33±0.01
7	ПВС 5 %, почва (1:7) (криогель)	125.7±0.8	0.34±0.01

Таблица 2

Всхожесть и сухая масса исследуемых растений с применением криогеля

Вариант опыта	Всхожесть семян, % по отношению к контролю	Сухая масса надземной части, г	Сухая масса подземной части, г
Контроль 1	100	8.62±0.3	2.08±0.4
Опыт 1	109±2	9.07±0.2	2.30±0.5
Контроль 2	100	37.47±0.6	7.38±0.3
Опыт 2	107±1.5	39.49±0.4	7.75±0.4



Таблица 3

Интенсивность фотосинтеза и транспирации клевера при его выращивании в криоструктурированной почве

Сутки опыта	Образец	Интенсивность фотосинтеза, $\mu\text{моль г}^{-1} \text{с}^{-1}$			Интенсивность транспирации, $\text{млмоль г}^{-1} \text{с}^{-1}$			Средняя эффективность использования воды, $\mu\text{моль CO}_2/\text{млмоль H}_2\text{O}$
		среднее	min	max	среднее	min	max	
30	Контроль	3.95	3.55	4.28	4.63	4.61	4.64	0.85
	Опыт	8.04	7.03	8.75	7.05	7.01	7.11	1.14
60	Контроль	3.43	2.07	5.00	7.08	7.04	7.13	0.48
	Опыт	12.89	10.72	14.10	7.11	7.01	7.21	1.81



STABILIZATION OF THE WEATHERED SOILS AND FORMATION OF PERMANENT GRASS GREEN COVER BY CRYOSTRUCTURING

*L.K. Altunina¹, L.I. Svarovskaya¹, T. Gan-Erdene², M.S. Fufaeva¹,
D.A. Filatov¹, Ch. Batjarga², M. Bayarjarga²*

¹Institute of petroleum Chemistry SB RAS, 4, Akademichesky Avenue, 634021 Tomsk, Russia, e-mail: sli@ipc.tsc.ru

*²Institute of Chemistry and Chemical Technology MAS, 13330 Ulaanbaatar, Mongolia,
e-mail: t_ganerdene@yahoo.com*

A new chemical-biological method of preventing soil erosion using cryogel in combination with perennial grasses is proposed. The cryogel is shown not to have negative impact on aboriginal soil microflora. On the one hand the cryogel polymer matrix in the soil is strong enough to withstand the effects of erosion but on the other hand it is quite elastic, so it will not hinder plant growth. The seeds germinated through the cryogel layer form a stable green cover. Cryogels are harmless to humans and environmentally friendly.