

ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗ И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ

УДК 502.654/.654:631.6

ПРИМЕНЕНИЕ КРИОГЕЛЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЧВ,
ПОДВЕРЖЕННЫХ ДЕФЛЯЦИИ

Л.К. Алтунина, М.С. Фуфаева, Д.А. Филатов, Л.И. Сваровская, Т. Ган-Эрдэнэ*

Институт химии нефти СО РАН, 634021, Томск, пр. Академический, 4, Россия; shi@ipc.tsc.ru
Институт химии и химической технологии Монгольской академии наук,
210646, Улан-Батор, Baga toiruu, 49, Монголия; t_ganerdene@yahoo.com

Предложен новый химико-биологический метод предотвращения ветровой эрозии (дефляции) почвы с применением криогеля в комплексе с высевом многолетних трав, способствующих формированию дернового горизонта. Полученная система “криогель – почвенные частицы”, 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 растительный покров. Показано, что криогель в почве, полученный с применением раствора поливинилового спирта методом замораживания – оттаивания, оказывает положительное влияние на численность аборигенной микрофлоры, ферментативную активность почвы и рост многолетних трав.

Эрозия почв, поливиниловый спирт, криогель, криоструктурированная почва, почвенная микрофлора, многолетние травы

APPLICATION OF CRYOGEL FOR STABILIZING SOILS UNDER DEFLATION

L.K. Altunina, M.S. Fufaeva, D.A. Filatov, L.I. Svarovskaya, T. Gan-Erdene*

Institute of Petroleum Chemistry, SB RAS, 634021, Tomsk, Akademicheskyy av., 4, Russia; shi@ipc.tsc.ru
Institute of Chemistry and Chemical Technology, MAS,
210646, Baga toiruu, 49, Ulan-Bator, Mongolia; t_ganerdene@yahoo.com

It has been demonstrated that being absorbed by soil, the cryogel obtained by the method of freezing-thawing with the use of polyvinyl alcohol solution has a positive effect on the size of indigenous microflora, soil enzyme activity, and growth of perennial grasses. A new chemical-biological method has been suggested to prevent wind erosion (deflation) of soil using cryogel combined with sowing of perennial grasses, which promote the formation of a soddy horizon. On the one hand, the prepared cryogel-soil particle system is strong enough to withstand the impacts of erosion processes but, on the other hand, it is elastic enough not to interfere with the growth of plants. The seeds germinated through a cryogel layer form a stable vegetable cover. Cryogels are harmless to humans and the environment.

Soil erosion, polyvinyl alcohol, cryogel, cryostructured soil, soil microflora, perennial grasses

ВВЕДЕНИЕ

Ветровая эрозия (или дефляция) – разрушение и снос верхних, наиболее плодородных горизонтов почв и подстилающих пород ветром. На территории, подверженной эрозии, ухудшаются физические свойства почв, гибнет растительность, засоляются грунтовые воды, резко падает биологическая продуктивность, снижается способность экосистем к восстановлению.

Обширные районы почв, подверженных эрозии, находятся в Китае, Монголии, России, Казахстане, Туркменистане, Пакистане, Непале и др.

Каждый год опустынивание и засуха приводят к потерям сельскохозяйственной продукции ориентировочно на сумму 42 млрд дол. США [Ковда, 2008].

Общая площадь почв России, подверженных процессам дефляции, по различным оценкам составляет от 50 до 100 млн га. Это районы Поволжья, Сибири, Забайкалья, Калмыкии и Астраханской области [Добровольский, 2002]. В Монголии под угрозой опустынивания находится более 80 % территории. Ситуацию усугубляет 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 "сломенными 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 эрозией почв находят глина, галька и прочие материалы [Елисеев, Чеверев, 2008]. При химической защите используют полимеры и битумные смеси, т. е. вещества, которые образуют на поверхности пленку склеенных частичек грунта [Елисеев, 2007].

Биологический способ закрепления песков заключается в посадке (посеве) многолетних трав, кустарниковых или древесных пород растений. Надежным средством закрепления почвы и создания прочного дернового слоя 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.

Наиболее перспективным направлением представляется комбинация химического и биологического способов защиты деградированных почв. С этой целью может быть использована технология ее криоструктурирования с применением водных растворов поливинилового спирта (ПВС). Растворы ПВС после цикла замораживания–оттаивания переходят из вязкотекучего состояния в упругие полимерные тела (криогели), способные к большим обратимым деформациям [Лозинский, 1998].

Криогели на основе ПВС образуются в условиях кристаллизации растворителя (для воды при температуре ниже 0 °С). Температура их плавления превышает +70 °С. 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 приводит к упрочнению криогеля [Лозинский и др., 2008]. Кроме того, криогели обладают микро- и макропористостью, что обеспечивает свободный массоперенос веществ в объеме криогеля.

Благодаря высокой прочности, выраженной пористости, биосовместимости, стабильности в биологических средах и экологической безвредности криогели нашли широкое применение в пищевой промышленности, медицине и биотехнологиях [Лозинский, 2002]. Они устойчивы во многих средах и мало подвержены биологическому разложению.

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. [Алтунина и др., 2006, 2010]. Твердые и мелкодисперсные ингредиенты грунта могут быть связаны в наполненный криогель, практически не подверженный ветровой эрозии. Преимуществом разрабатываемого метода является комплексный подход к решению проблемы опустынивания почв, основанный на применении криогелей в комплексе с многолетними травами.

Цель исследования – разработка способа криоструктурирования почвы и создание растительного покрова из многолетних трав для стабилизации почв, подверженных ветровой эрозии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях исследован образец ПВС со средней молекулярной массой, равной 75 000, и характеристической вязкостью его водных растворов $\eta = 0,56$ дл/г.

Для получения 5%-го водного раствора ПВС сухой порошок полимера (50 г) пропитывали водой (950 см³) способом капиллярной фильтрации при нагревании на водяной бане при температуре $T = 70\text{--}90$ °С с перемешиванием до полного растворения полимера. Полученный раствор ПВС охлаждали, взвешивали и доливали испарившуюся воду. Вязкость водных растворов ПВС измеряли на ротационном вискозиметре в интервале скоростей сдвига от 3 до 1312 с⁻¹ при температуре 30 °С.

Для формирования криогелей водный раствор ПВС в концентрации 5 мас.% заливали по 10 см³ в металлические ячейки с внутренним диаметром 10 мм и высотой 28 мм и замораживали при $T = -20$ °С в течение 20 ч. Твердые ледяные образцы размораживали в течение 4 ч при комнатной температуре ($T = 20$ °С) со скоростью 0,15 °С/мин. При 3–4-кратном замораживании–оттаивании получали упругие криогели.

Для получения криогелей, наполненных почвой, водный раствор ПВС (5 мас.%) смешивали с просеянной лесной дерново-подзолистой почвой в соотношении 1:7. 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 газонной травы (*Deschampsia caespitosa*, сорт Баркампися). Затем почву с высеянными семенами растений покрывали тонким слоем оставшейся массы (почва/раствор ПВС). После цикла замораживания–оттаивания получали криоструктурированную почву с внесенными семенами. Контролем служила почва без криогеля.

Модуль упругости криогеля и криоструктурированной почвы определяли на лабораторной установке, в основе которой лежит модель Максвелла [Виноградов, 1977].

Коэффициент теплопроводности криогеля и криоструктурированной почвы определяли с помощью установки, состоящей из двух стальных коаксиальных цилиндров, в зазоре между которыми находилась исследуемая среда [Касаткин, 1971]. Интенсивность испарения воды с поверхности контрольной и криоструктурированной почвы определяли гравиметрическим методом по стандартной методике [Будаговский, 1964].

Динамику естественной почвенной микрофлоры изучали на примере гетеротрофных бактерий, участвующих в создании почвенного плодородия. Их численность определяли методом посева на мясо-пептонный агар (МПА) в чашки Петри и выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) [Звягинцев, 1991]. Количество колоний 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 кубических сантиметрах кислорода, выделившегося на 1 г почвы [Хазиев, 2005]. Через каждые 2–3 суток отбирали пробы почвы для определения численности микроорганизмов и каталазной почвенной активности.

Измерение газообмена семян проводили один раз в месяц с помощью портативного инфракрасного газоанализатора Li-Cor 6400 (Li-Cor, USA). Эффективность использования воды рассчитывали как отношение скорости фотосинтеза к транспирации и выражали в $\text{мкмоль CO}_2/\text{ммоль H}_2\text{O}$ [Sinclair, 1984].

В конце эксперимента определяли сухую массу надземной и подземной частей растений гравиметрическим методом, для чего растение освобождали от частичек почвы и сушили в шкафу при температуре 60°C до постоянной массы [Blum, 2005]. Эксперименты повторяли три раза. Повторность измерений в экспериментах пятикратная. Обработку результатов осуществляли с помощью статистического пакета MS Office Excel 2003.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При изучении вязких свойств растворов ПВС с концентрацией 1–10 мас.% 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 [Алтунина и др., 2006]. Для получения криогеля нами применялись растворы ПВС с минимальной концентрацией полимера 5%.

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

В табл. 1 приведены значения модуля упругости (G , кПа) и коэффициента теплопроводности (λ , Вт/(м·К)) после первого цикла замораживания–оттаивания.

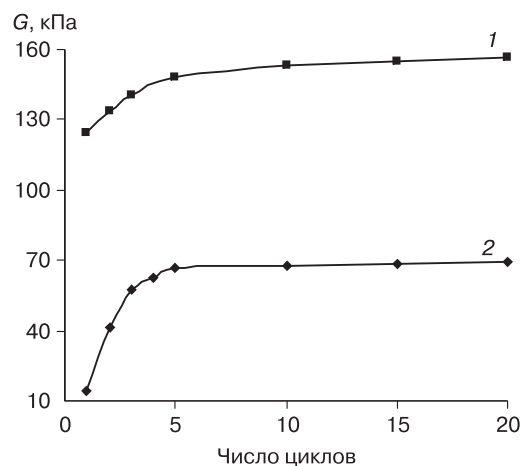


Рис. 1. Влияние циклов замораживания–оттаивания на упругие свойства криогелей:

1 – раствор ПВС (5 мас.%) с почвой в соотношении 1:7; 2 – водный раствор ПВС (5 мас.%).

Таблица 1. Механические и теплофизические параметры криогелей

Состав, мас. %	Параметры криогелей	
	G, кПа	λ , Вт/(м·К)
Воздух	–	0,030 ± 0,001
Вода	–	0,63 ± 0,01
Почва влажная (влажность 30 %)	–	0,45 ± 0,02
5%-й раствор ПВС	–	0,42 ± 0,01
Криогель (на основе 5%-го р-ра ПВС)	14,5 ± 0,5	0,33 ± 0,01
5%-й раствор ПВС : почва (1:7)	–	0,39 ± 0,02
Криогель : почва (1:7)	125,7 ± 0,8	0,34 ± 0,01

ния–оттаивания. Полученные данные показали, что модуль упругости G трехкомпонентного криогеля в 8,5 раз больше по сравнению с двухкомпонентным, т. е. частички почвы прочно склеиваются, что важно при разработке способа защиты эродированных почв.

Коэффициенты теплопроводности λ воды, влажной и криоструктурированной почв составляют 0,63, 0,45 и 0,34 Вт/(м·К) соответственно (см. табл. 1). Следовательно, прослойки полимерной матрицы между мелкодисперсными частицами наполнителя (почвы) выполняют демпфирующую функцию и снижают теплопроводность криогеля, наполненного почвой, почти на 50 и 25 % по сравнению с водой и влажной почвой соответственно.

Испарение с поверхности почвы зависит от многих факторов и в первую очередь от ее физических свойств. Изменение массы двух- и трехкомпонентного криогелей исследовали при их хранении на открытом воздухе при температуре 20 °С. Проведенный эксперимент показал, что процесс потери массы интенсивно протекает в первые несколько суток. Уменьшение массы криоструктурированной почвы обусловлено в основном испарением воды, в сухом остатке – полимер и почва. Из результатов следует, что двухкомпонентный

криогель полностью потерял влагу на 9-е сутки эксперимента, дальше его масса не изменялась. Испарение из контрольной почвы длилось 6 сут, на 7-е сутки ее масса перестала изменяться. В криоструктурированной почве испарение воды с поверхности длилось 19 сут, и только на 20-е сутки опыта масса почвы перестала изменяться. Таким образом, интенсивность испарения влаги уменьшается при формировании криоструктурированной почвы. Вероятно, полимерная матрица криогеля дольше удерживает влагу и препятствует ее испарению с поверхности почвы, поэтому в период высоких среднесуточных температур почва будет меньше высыхать, тем самым повышая выживаемость посаженных в нее растений.

Жизнедеятельность почвенной микрофлоры и прорастание семян в криоструктурированной почве. Значительную роль в процессах повышения плодородия почвы и питания растений играет почвенная микрофлора. С ее активностью связаны многие процессы, протекающие в почве, в первую очередь круговорот биогенных элементов, утилизация органических и минеральных соединений, синтез ферментов, витаминов, аминокислот, ауксинов и хелатов.

Результаты опытов показали, что криогель, применяемый в качестве криоструктуранта, не угнетает процессы роста и развития почвенной микрофлоры. На рис. 2 представлена динамика численности аммонифицирующих бактерий в контрольной и криоструктурированной почве. Исходная численность исследуемых микроорганизмов определялась в интервале $40 \cdot 10^3$ – $60 \cdot 10^3$ КОЕ на 1 г почвы. В опытных вариантах в течение эксперимента численность микроорганизмов превышала контрольные данные в 1,5–2 раза (см. рис. 2).

Исследование ферментативной активности криоструктурированной почвы показало, что активность каталазы на протяжении всего эксперимента сравнима с контролем, но в определенные

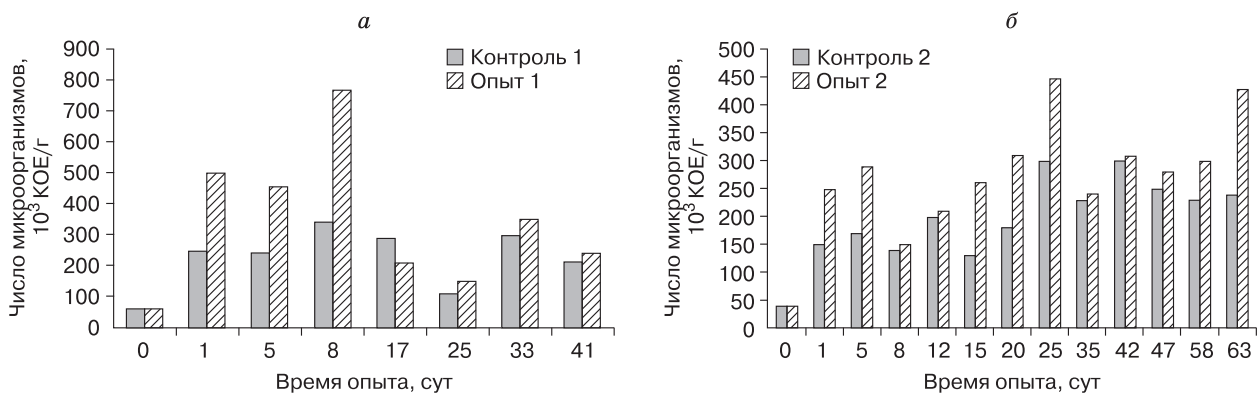


Рис. 2. Численность гетеротрофной микрофлоры в криоструктурированной почве с высевом семян и образованием зеленого покрова газонной травы (а) и клевера ползучего (б).

Таблица 2. Биометрические параметры растений, выращенных в криоструктурированной почве

Растение	Всхожесть семян, % от контроля	Сухая масса надземной части, г		Сухая масса подземной части, г	
		Контроль	Опыт	Контроль	Опыт
Газонная трава	109 ± 2	8,62 ± 0,30	9,07 ± 0,20	2,08 ± 0,40	2,30 ± 0,50
Клевер	107,0 ± 1,5	37,47 ± 0,60	39,49 ± 0,40	7,38 ± 0,30	7,75 ± 0,40

Таблица 3. Изменение физиологических параметров клевера при выращивании в криоструктурированной почве

Время опыта, сут	Образец	Интенсивность фотосинтеза, мкмоль/(с·г)			Интенсивность транспирации, ммоль/(с·г)			Средняя эффективность использования воды, мкмоль CO ₂ /ммоль H ₂ O
		сред.	мин.	макс.	сред.	мин.	макс.	
30	Контрольный	3,95	3,55	4,28	4,63	4,61	4,64	0,85
	Опытный	8,04	7,03	8,75	7,05	7,01	7,11	1,14
60	Контрольный	3,43	2,07	5,00	7,08	7,04	7,13	0,48
	Опытный	12,89	10,72	14,10	7,11	7,01	7,21	1,81

интервалы времени превышает контрольные данные на 3–7 %.

Семена газонной травы и клевера проросли одновременно в контрольной и криоструктурированной почве на 6-е и 2-е сутки соответственно. Всхожесть семян в криоструктурированной почве определяли в процентах по отношению к контролю (обычная почва), который принимали за 100 %. В криоструктурированной почве всхожесть семян на 7–9 % превышает контрольные данные. Сухая масса надземной части растений и корневой системы в конце эксперимента в опытном варианте на 5 % выше по сравнению с контролем (табл. 2).

Таким образом, увеличение численности микрофлоры, ферментативной активности почвы, а также более высокие показатели всхожести и сухой массы растений, вероятно, связаны с тем, что криогель, меняя физические свойства почвы, благотворно влияет на жизнедеятельность микрофлоры и выживаемость растений.

Одним из наиболее часто используемых параметров, который, как полагают некоторые исследователи, коррелирует с продуктивностью, является интенсивность видимого фотосинтеза [Чиков, 2008]. Скорость фотосинтеза зависит от внешних условий и отражает состояние растения на всех стадиях онтогенеза.

Проведенные исследования показали достоверные различия между вариантами опыта по интенсивности фотосинтеза и транспирации. Оба показателя на 30-е сутки роста были выше у клевера, выращенного в криоструктурированной почве (табл. 3). Интенсивность фотосинтеза на 60-е сутки в контрольном образце осталась прежней, в опытном – возросла в 3,8 раза. Интенсивность транспирации на 60-е сутки в обоих вариантах была практически одинаковой. Эффективность использования воды растениями, выращенными на криоструктурированной почве, на 30-е сутки

была выше на 20 %, на 60-е – на 260 %. Это косвенно свидетельствует о том, что криогель в почве удерживает влагу и, следовательно, растения, выращенные на криоструктурированной почве, обладают более высокой адаптивностью по сравнению с контролем.

ВЫВОДЫ

Предложен новый химико-биологический метод предотвращения ветровой эрозии почвы с применением криогеля на основе поливинилового спирта в комплексе с многолетними травами.

Продемонстрирована возможность включения частичек почвы в матрицу криогеля. Установлено, что модуль упругости криогеля, наполненного почвой, в 8,5 раз выше по сравнению с двухкомпонентным (без почвы), т. е. частички почвы прочно скрепляются, что важно при разработке способа защиты почв, подверженных дефляции.

Выявлено, что коэффициент теплопроводности криоструктурированной почвы на 30 % ниже, чем у обычной влажной почвы.

Показано, что криогель, меняя физические свойства почвы, оказывает положительное влияние на аборигенную почвенную микрофлору, каталазную активность почвы и выживаемость растений.

Экспериментально подтвержденным преимуществом структурированной почвы является то, что посеянные в нее семена хорошо прорастают и формируют устойчивый растительный покров. Доказано, что растения, выращенные в почве с криогелем, обладают более высокой адаптивностью по сравнению с контролем.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта № 11, выполняемого в Сибирском отделении РАН совместно с Академией наук Монголии и Министерством образования, культуры и науки Монголии.

Литература

- Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Долгих С.Н. Криогели для тампонажных работ в районах распространения многолетнемерзлых пород // Гидротехника, 2010, № 3, с. 56–60.
- Алтунина Л.К., Манжай В.Н., Фуфаева М.С. Механические и теплофизические свойства криогелей и пенокриогелей, полученных из водных растворов поливинилового спирта // Журн. прикл. химии, 2006, т. 79, № 10, с. 1689–1692.
- Будаговский А.И. Испарение почвенной влаги / А.И. Будаговский. М., Наука, 1964, 243 с.
- Виноградов Г.В. Реология полимеров / Г.В. Виноградов, А.Я. Малкин. М., Химия, 1977, 440 с.
- Добровольский Г.В. Деградация и охрана почв / Г.В. Добровольский. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 654 с.
- Елисеев А.В. Комплексирование методов для защиты территории от эрозионных процессов // Пром. и гражд. стр-во, 2007, № 9, с. 48–54.
- Елисеев А.В., Чеверев В.Г. Метод защиты дисперсных грунтов от эрозии // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 36–40.
- Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Д.Г. Звягинцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1991, 304 с.
- Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. М., Химия, 1971, 784 с.
- Ковда В.А. Проблемы опустынивания и засоления почв аридных регионов мира / В.А. Ковда. М., Наука, 2008, 415 с.
- Лозинский В.И. Криотропное гелеобразование растворов поливинилового спирта // Успехи химии, 1998, т. 67, № 7, с. 641–655.
- Лозинский В.И. Криогели на основе природных и синтетических полимеров: получение свойства и области применения // Успехи химии, 2002, т. 71, № 6, с. 559–585.
- Лозинский В.И., Дамшкалн Л.Г., Курочкин И.Н., Курочкин И.И. Изучение криоструктурирования полимерных систем. Физико-химические свойства и морфология криогелей поливинилового спирта, сформированных многократным замораживанием–оттаиванием // Коллоид. журн., 2008, т. 70, № 2, с. 212–222.
- Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии / Ф.Х. Хазиев. М., Наука, 2005, 252 с.
- Чиков В.И. Эволюция представлений о связи фотосинтеза с продуктивностью растений // Физиология растений, 2008, т. 55, № 1, с. 140–154.
- Blum A. Drought resistance, water-use efficiency, and yield potential – are they compatible, dissonant, or mutually exclusive? // Aust. J. Agricultural Res., 2005, No. 56, p. 1159–1168.
- Sinclair T.R., Tanner C.B., Bennett J.M. Water-use efficiency in crop production // BioScience, 1984, vol. 34, No. 1, p. 36–40.

*Поступила в редакцию
12 сентября 2012 г.*