5. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 325 с.

6. *Касимов Н.С.* Геохимия степных и пустынных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 184 с.

7. *Базилевич Н.И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М.: Наука, 1993. – 294 с.

8. *Егоров А.Д., Григорьева Д.В., Курилюк Т.Т., Сазонов Н.Н.* Микроэлементы в почвах и лугопастбищных растениях мерзлотных ландшафтов Якутии. – Якутск: Кн. изд-во, 1970. – 288 с.

9. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. – М.: Наука, 1965. – 374 с.

10. *Ковалевский А.Л.* Биогеохимия растений. – Новосибирск: Наука, 1991. – 294 с.

11. *Базилевич Н.И., Панкова Е.И.* Методические указания по учету засоленных почв. – М.: Гипроводхоз, 1968. – 50 с.

Поступила в редакцию 28.01.2014

УДК 614.77:630*114(571.56)

Ферментативная активность мерзлотной лугово-черноземной почвы транспортной зоны «Аэропорт–Якутск»

М.В. Щелчкова, М.С. Жерготова

В результате рассеивания выхлопных газов автомобилей в мерзлотной лугово-черноземной почве транспортной зоны «Аэропорт–Якутск» накапливаются тяжелые металлы Pb, Zn и Cu. Приоритетным загрязнителем является Pb, валовое содержание которого превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 3 раза. Максимальное содержание кисло растворимого Pb (54 мг/кг) не достигает ПДК, но в 13 раз превышает фоновое значение. Зона загрязнения распространяется на 50 м от источника. Мерзлотная лугово-черноземная почва фонового участка, удаленного от автотрассы на 250 м, характеризуется высоким ферментным потенциалом. Инвертазная, фосфатазная, каталазная активность проявляется во всех генетических горизонтах почвы, включая почвообразующую породу, уреазная и дегидрогеназная активность – преимущественно в гумусово-аккумулятивных горизонтах А и АВ. Загрязнение почв тяжелыми металлами негативно отражается на уровне их каталитической активности. Активность инвертазы падает приблизительно в 3–5 раза по сравнению с фоном, фосфатазы – в 4–5, уреазы – в 3–4, каталазы – в 4–10, дегидрогеназы – в 2–4 раза соответственно. Замедление скоростей биохимических реакций гидролитического разложения и окисления органических веществ понижает экологические функции городских почв транспортных зон. Наиболее чувствительны к загрязнению гидролитические ферменты инвертаза и уреаза и окислительно-восстановительный фермент каталаза. Между активностью этих ферментов и содержанием свинца в почвах выявляется статистически достоверная обратно пропорциональная связь высокой силы (–0,697≤r≤–0,927, при P=0,95). Активность уреазы, инвертазы и каталазы можно использовать в мониторинге загрязнения мерзлотных почв тяжелыми металлами.

Ключевые слова: выхлопные газы, тяжелые металлы, ферментативная активность почв, гидролитические и окислительно-восстановительные ферменты.

The heavy metals such as Pb, Zn and Cu accumulate in permafrost meadow-chernozem soil of the transport area «Airport–Yakutsk» as a result of exhaust gases dispersion. The priority pollutant is Pb, which total content reaches up to 3 MAC (maximum allowable concentrations). Maximum content of the acid soluble Pb (54 mg / kg) does not reach the MAC, but is 13 times more than background value. The area of contamination extends to 50 m from the source of pollution. Permafrost meadow-chernozem soil of the background portion remote from the highway at 250 m is characterized by high enzyme potential. Invertase, phosphatase, catalase activities are found in all genetic soil horizons, including the soil-forming sediments. Urease and dehydrogenase activities are restricted mainly in the humus-accumulative horizons A and AB. Contamination of soils with heavy metals negatively affects the level of their catalytic activity. Invertase activity drops by about 3-5 times compared with the background, phosphatase activity – in 4-5 times, urease activity – in 3-4 times, catalase activity – in 4-10 times, dehydrogenase one – in 2-4 times respectively. Slow-

ЩЕЛЧКОВА Марина Владимировна – к.б.н., в.н.с. ИЕН СВФУ, mar-shchelchkova@yandex.ru; ЖЕРГОТОВА Мария Сергеевна – стажер-исследователь ИЕН СВФУ, zhergotova87mari@mail.ru.

ing down of the rates of biochemical reactions hydrolytic decomposition and oxidation of organic matter reduces ecological functions of urban soils of transport zones. The hydrolytic enzymes invertase and urease and redox enzyme catalase are most susceptible to contamination. The statistically significant inverse relationship between the activity of these enzymes and lead content in soils is detected (–0,697≤r≤–0,927, at P=0,95). Urease, invertase and catalase activity can be used in monitoring of soil contamination with heavy metals.

Key words: exhaust gases, heavy metals, enzymatic activity of soil, hydrolytic and oxidation-reduction enzymes.

Введение

Городские почвы представляют собой центральное звено урбаэкосистемы. Они замыкают биогеохимические круговороты веществ, регулируют газообмен, формируют среду для флоры и фауны, осуществляют процессы самоочищения от патогенных микроорганизмов и химических поллютантов. Мощными агентами трансформации поступающих в почву органических и минеральных соединений естественного и техногенного происхождения являются почвенные микроорганизмы и почвенные ферменты. Возрастающие техногенные нагрузки на городские почвы приводят к угнетению микробиологической и ферментативной активности и ослаблению экологических функций почв. Особенно активная деградация почв происходит в городах с химической промышленностью и в районах Севера [1].

Мы изучали влияние выхлопов автотранспорта на химические свойства и ферментативную активность мерзлотных лугово-черноземных почв г. Якутска. На сегодняшний день в г. Якутске зарегистрировано 62796 автомобилей, что на 10% выше, чем в 2000 г. Вклад автотранспорта в суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу велик и составляет 52%, а по некоторым компонентам, например, оксиду углерода, может достигать 76,5%. В состав выхлопных газов автомобилей входят разнообразные высокотоксичные вещества: оксиды углерода, азота и серы, смесь углеводородов, в том числе канцерогенные формальдегид и бензапирен, альдегиды и широкий спектр тяжелых металлов (свинец, цинк, кадмий, никель, медь, олово, ртуть) [2]. Эти вещества в виде тонкодисперсных частиц и аэрозолей переносятся в сопредельные среды, загрязняя почвы и воды.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования была мерзлотная лугово-черноземная почва транспортной зоны «Аэропорт–Якутск». В почве исследовали активность широкого спектра гидролитических (инвертаза, фосфатаза, уреаза, протеаза) и окислительно-восстановительных (каталаза и дегидрогеназа) ферментов. Данные ферменты широко распространены в почвах и играют важную почвообразующую и экологическую роль. Они принимают участие в трансформации органических соединений, биогенезе гумуса, осуществляют круговорот биогенных элементов углерода, фосфора, азота, поддерживают почвенный гомеостаз [3, 4].

Исследования проводили в 2010–2011 гг. С учетом розы ветров справа от автотрассы «Аэропорт–Якутск» на расстоянии 2, 5, 10, 20, 50, 100, 250 м закладывали опытные площадки, на которых 2 раза за вегетационный период отбирали смешанные почвенные пробы с глубин 0–10 и 10–20 см для определения ферментативной активности [5]. Активность инвертазы выражали в мг глюкозы/г почвы×ч, уреазы – в мг NH_4^+/г почвы×24ч, фосфатазы – в мг фенолфталеина/г почвы×ч, каталазы – в мл O_2/г×мин, дегидрогеназы – в мл трифенилформазана (ТФФ)/10 г почвы×24ч.

Наряду с этим изучали загрязнение почв. Методом снегосъемки определяли пылевую нагрузку на почвы. В пыли методом индукционно-связанной плазмы устанавливали валовое содержание тяжелых металлов Pb, Zn, Cu, Cd и рассчитывали интенсивность поступления их на поверхность почвы. В почвах также определяли содержание подвижных кисло растворимых форм Pb, Zn, Cu, Cd и их валовое количество.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что наиболее сильному запылению подвержена 5-метровая зона, прилегающая к дороге – в течение одного года на 1 м^2 поверхности выпадает в среднем 184 г пыли (табл. 1). В составе пыли на 1 м^2 поверхности поступает 6,13 мг Pb; 37,47 мг Zn; 8,12 мг Cu и менее 0,02 мг Cd. На расстоянии 20–50 м от дороги пылевая нагрузка и поступление тяжелых металлов снижаются приблизительно в 10 раз, а на расстоянии 100–250 м – в 100 раз.

Верхние слои придорожных почв накапливают тяжелые металлы (табл. 2).

Наиболее сильно загрязнен верхний 10-сантиметровый слой почвы. В нем повышенное содержание Pb и Zn отмечается на расстоянии до 50 м от дороги, а Cu – лишь до 2 м от дороги. В этой зоне валовое содержание Pb превышает

Таблица 1

Количество загрязняющих веществ, выпадающих на почвы, расположенные в зоне влияния автотрассы «Аэропорт–Якутск» в течение одного года

Загрязняющие вещества	Расстояние от автотрассы, м			
	5	20	50	250
Пыль, г/м^2 (т/ км^2)	184,32	14,59	10,84	1,45
Pb, мг/м^2 (кг/ км^2)	6,13	0,73	0,71	0,07
Zn, мг/м^2 (кг/ км^2)	37,47	2,97	2,20	0,29
Cu, мг/м^2 (кг/ км^2)	8,12	1,03	0,67	0,09
Cd, мг/м^2 (кг/ км^2)	<0,020	<0,002	<0,001	<0,001

Таблица 2

Валовое содержание тяжелых металлов в мерзлотной лугово-черноземной почве транспортной зоны «Аэропорт–Якутск», мг/кг

Металл	Глубина, см	Расстояние от автотрассы, м							ПДК
		2	5	10	20	50	100	250	
Pb	0–10	97,2	97,4	79,9	43,3	23,6	10,1	10,4	30
	10–20	25,1	20,3	10,0	10,8	8,5	6,8	5,8	
Zn	0–10	31,7	78,7	90,3	64,3	244,4	50,4	56,4	100
	10–20	38,2	36,9	38,6	45,6	45,7	49,0	45,3	
Cu	0–10	49,1	13,6	14,9	12,6	14,1	11,9	13,5	55
	10–20	8,9	9,5	10,5	11,8	11,6	12,1	12,8	

Таблица 3

Содержание кисло растворимых форм тяжелых металлов в мерзлотной лугово-черноземной почве транспортной зоны «Аэропорт–Якутск», мг/кг

Металл	Глубина, см	Расстояние от автотрассы, м							ПДК
		2	5	10	20	50	100	250	
Pb	0–10	10,2	53,6	39,2	20,8	11,6	4,3	3,7	60
	10–20	24,6	9,5	3,6	4,4	3,7	2,9	2,7	
Zn	0–10	12,2	34,6	29,4	18,0	118,5	10,5	10,7	60
	10–20	16,8	8,9	6,9	9,9	34,4	8,3	11,4	
Cu	0–10	2,4	5,3	4,9	3,8	4,4	2,8	3,0	50
	10–20	3,6	3,0	2,6	3,1	2,9	3,1	3,1	

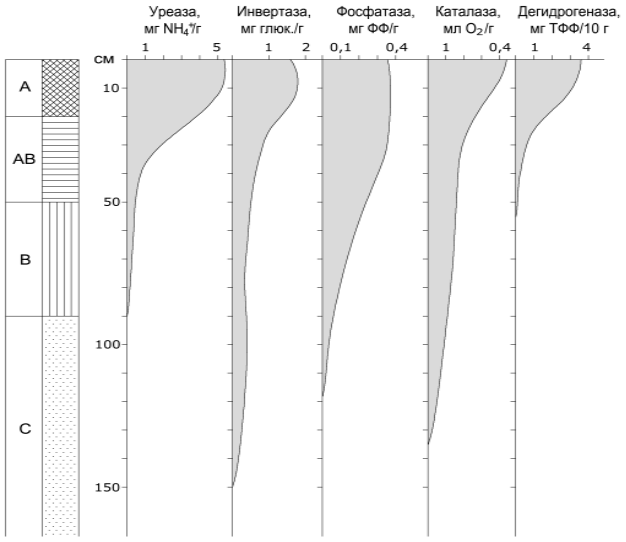
фоновые значения (10,1 мг/кг) в 2–9,5 раза, а предельно допустимые концентрации (ПДК) – в 1,5–3 раза. Максимальное накопление Pb отмечается в 10-метровой придорожной зоне, где его концентрация составляет 79,9–97,4 мг/кг. Валовое содержание цинка в почвах около автотрассы распределено неравномерно: на фоновом участке его концентрация составляет 56 мг/кг; на расстоянии 5 и 10 м приближается к ПДК (79 и 90 мг/кг), а на расстоянии 50 м превышает ПДК в 2,5 раза и составляет 244 мг/кг. Повышенное содержание меди в почвах (49 мг/кг) отмечается лишь в непосредственной близости от автотрассы. Анализ содержания кадмия показал, что его количество в придорожных почвах незначительно (<0,25 мг/кг).

Нижележащий слой почвы (10–20 см) загрязнен только свинцом. Накопление этого элемента в концентрациях, выше фоновых, наблюдается на расстоянии до 50 м от автотрассы. Максимальное содержание Pb 20–25 мг/кг фиксируется на расстоянии до 5 м от источника загрязнения.

Наибольшую опасность для почвенных микроорганизмов и ферментов представляют подвижные формы тяжелых металлов. Они наиболее мобильны, могут переходить в почвенный раствор и активно участвовать в химических реакциях с органическими и неорганическими компонентами почвы. Взаимодействуя с ферментами, они могут изменять их конформацию и понижать активность. Физико-химические свойства мерзлотных лугово-черноземных почв (высокое содержание гумуса, слабощелочная реакция среды, суглинистый гранулометрический состав) определяют слабую подвижность Pb и среднюю подвижность Cu и Zn в данных почвах. Исследование кисло растворимых форм тяжелых металлов показало, что их содержание в почвах придорожной зоны не препревышает ПДК (табл. 3). Однако отмечается накопление подвижных форм металлов на расстоянии 50 м от автотрассы по сравнению с фоном. Максимальное содержание кисло растворимого Pb составляет 54 мг/кг при значении ПДК 60 мг/кг, что в 13 раз выше фонового значения 4 мг/кг. Содержание кисло растворимого Zn равно приблизительно 30 мг/кг, а на расстоянии 50 м от автотрассы его количество достигает 118 мг/кг, что соответствует 2 ПДК. Содержание кисло растворимой Cu в исследуемых почвах низкое – 3–5 мг/кг, что в 10 раз ниже ПДК для этой формы металла.

Таким образом, в мерзлотной лугово-черноземной почве транспортной зоны в результате рассеивания выхлопных газов накапливаются тяжелые металлы Pb, Zn и Cu. Зона загрязнения распространяется до 50 м от источника. Приоритетным загрязнителем является Pb, валовое содержание которого достигает 3 ПДК. Превышение валового содержания этого элемента над фоном 10-кратное, а подвижной кисло растворимой формы – 13-кратное. Такое загрязнение почвы можно оценить как слабое [6]. Локальное загрязнение почвы цинком в точке, удаленной от автотрассы на 50 м, имеет, вероятно, антропогенное происхождение, но непосредственно не связано с выхлопами автотранспорта. Полученные нами данные хорошо согласуются с проведенными ранее исследованиями [7– 9].

Изучение ферментативной активности мерзлотной лугово-черноземной почвы на фоновом участке (250 м от автотрассы) показало, что она обладает высоким биохимическим потенциалом. По уровню инвертазной активности данная почва оценивается как очень богатая, уреазной активности – как богатая, каталазной активности – как среднеобогащенная, дегидрогеназной активности – как бедная [10]. Генетические свойства мерзлотной лугово-черноземной почвы: ярко выраженный дерновый процесс, значительная мощность гумусово-аккумулятивных горизонтов А+АВ (50 см), насыщенность почвенного профиля гумусом и общим азотом, преобладание в почвенном поглощающем комплексе ионов кальция и магния, слабощелочная реакция среды и легкосуглинистый гранулометрический состав создают благоприятные условия для активного развития микрофлоры, продукции и иммобилизации ферментов в почве. Нами установлено, что в профиле исследуемой почвы особенно высоко содержание бактерий, использующих в качестве источников питания органические субстраты и выделяющих в окружающую среду разнообразные внеклеточные гидролазы. Их численность в верхнем 10-сантиметровом слое достигает 50 млн. КОЕ/г, постепенно снижается с глубиной, но даже в нижней части профиля – горизонте С, на глубине 90 см, количество бактерий составляет 1,8 млн. КОЕ/г. Эти особенности определяют высокую ферментативную активность не только в гумусово-аккумулятивных горизонтах почвы, но практически по всему почвенному профилю (рисунок).



Профильное распределение ферментативной активности в мерзлотной лугово-черноземной почве

Таблица 4

Ферментативная активность мерзлотной лугово-черноземной почвы транспортной зоны «Аэропорт–Якутск»

Фермент	Глубина, см	Расстояние от автотрассы, м						
		2	5	10	20	50	100	250
2010 г.								
Инветаза, мг глюкозы	0–10	0,42	0,94	1,10	1,56	2,00	1,31	1,63
	10–20	0,55	2,47	1,00	1,56	0,68	1,30	1,69
Фосфатаза, мг фенолфталеина	0–10	0,36	1,25	1,21	0,83	0,79	6,37	1,90
	10–20	0,34	0,75	0,40	0,63	0,81	6,16	1,78
Уреаза, мг NH_4^+	0–10	1,76	3,30	2,95	4,04	2,30	6,13	5,25
	10–20	1,63	1,35	1,23	3,71	1,18	1,86	4,49
Каталаза, мл O_2	0–10	0,37	2,30	2,47	5,47	3,73	6,60	4,20
	10–20	0,80	1,80	1,67	5,63	3,07	4,30	3,00
Дегидрогеназа, мг ТФФ	0–10	2,33	5,52	5,72	8,04	7,07	5,18	3,83
	10–20	2,28	1,07	1,48	3,11	1,80	2,23	2,14
2011 г.								
Инветаза, мг глюкозы	0–10	0,98	2,03	2,03	2,27	3,10	4,17	4,50
	10–20	1,13	2,01	1,39	1,93	1,76	2,41	2,72
Фосфатаза, мг фенолфталеина	0–10	0,14	0,37	0,23	0,50	0,43	0,58	0,60
	10–20	0,18	0,28	0,31	0,45	0,47	0,47	0,60
Уреаза, мг NH_4^+	0–10	1,14	2,11	1,49	1,67	3,34	2,76	3,16
	10–20	0,35	0,60	0,530	2,25	1,29	1,81	2,53
Каталаза, мл O_2	0–10	0,70	1,37	2,03	1,50	1,73	2,56	2,74
	10–20	0,90	0,70	0,56	1,63	1,86	2,67	2,70
Дегидрогеназа, мг ТФФ	0–10	1,63	2,22	2,76	4,25	6,57	5,89	6,34
	10–20	1,13	1,02	1,99	3,99	2,56	2,74	2,36

Загрязнение почв выхлопами автотранспорта и накопление в них тяжелых металлов приводят к снижению активности гидролитических и окислительно-восстановительных ферментов (табл. 4). По мере приближения к источнику загрязнения активность инвертазы понижается приблизительно в 3–5 раза по сравнению с фоном, фосфатазы – в 4–5, уреазы – в 3–4, каталазы – в 4–10, дегидрогеназы – в 2–4 раза соответственно. Снижение ферментного потенциала почвы носит тотальный характер и наблюдается как в поверхностном слое 0–10 см, так и в нижележащем слое 10–20 см. Это свидетельствует о том, что в почвах, загрязненных выхлопами автотранспорта, скорость биохимических реакций минерализации и трансформации органических веществ замедляется, ухудшаются экологические свойства почв.

Одним из вероятных механизмов инактивации почвенных ферментов является непосредственное взаимодействие ионов тяжелых металлов с сульфгидрильными группами белковых молекул, что в свою очередь приводит к изменению их конформации и потере активности. Наряду с этим тяжелые металлы могут оказывать токсическое действие на почвенные микроорганизмы, снижать их метаболическую активность и интенсивность выделения внеклеточных ферментов в окружающую среду [11].

Негативное воздействие тяжелых металлов, содержащихся в выхлопах автотранспорта, на каталитическую активность мерзлотной лугово-черноземной почвы подтверждается наличием обратно пропорциональных связей между активностью изученных ферментов и содержанием свинца в почве. Наиболее высокие и достоверные при p=0,95 коэффициенты корреляции выявляются для каталазы в почвенном слое 0–10 см (–0,807 ≤r≤ –0,836) и 10–20 см (–0,693 ≤r≤ –0,927), а так же для уреазы (–0,697 ≤r≤ –0,798) и инвертазы (–0,822 ≤r≤ –0,913) в почвенном слое 0–10 см.

Таким образом, наши исследования показали, что каталаза, уреаза и инвертаза обладают высокими диагностическими свойствами, так как даже при слабом уровне загрязнения мерзлотных лугово-черноземных почв свинцом наблюдается статистически достоверное снижение их активности. Данные ферменты могут использоваться при мониторинге загрязнения мерзлотных почв выхлопами автотранспорта и тяжелыми металлами.

Литература

1. *Почва.* Город. Экология. – М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. – 320 с.

2. *Государственный* доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2011 году. – Якутск: Компания «Дани Алмас», 2012. – 216 с.

3. *Купревич В.Ф.* Научные труды. – Т. 4. – Минск: Наука и техника, 1974. – 403 с.

4. *Хазиев Ф.Х.* Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. – М.: Наука, 1982. – 203 с.

5. *Хазиев Ф.Х.* Методы почвенной энзимологии. – М.: Наука, 2005. – 252 с.

6. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва – растение. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.

7. *Ильина Л.П., Алексеев А.А.* Тяжелые металлы в растениях и почве у автомобильных дорог // Использование и охрана сельскохозяйственных ресурсов Якутии. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. – С. 38–45.

8. *Якутский* картографический атлас. – Якутск: ОАО «Сахагипрозем», 2007. – 110 с.

9. *Избекова Ю.Д., Щелчкова М.В.* Влияние выхлопов автотранспорта на ферментативную активность почв Якутска // Экология фундаментальная и прикладная. Проблемы урбанизации: мат-лы Межд. научно-практич. конф. (3–4 февраля 2005 г.) – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2005. – С. 137–138.

10. *Звягинцев Д.Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. – 1978. – №6. – С. 48–53.

11. *Галиулин Р.В., Галиулина Р.А.* Концептуальная модель ферментативной индикации загрязнения почвы тяжелыми металлами // Геоэкологические проблемы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами: мат-лы 3-й Межд. геоэкологической конф. – Тула: Изд-во ТГУ, 2006. – С. 100–104.

Поступила в редакцию 18.04.2014

УДК 581.9(571.56)

Дикие родичи культурных растений в растительных сообществах природной территории Ботанического сада СВФУ

Н.С. Данилова

Изложены результаты изучения диких родичей культурных растений (ДРКР) в природных растительных сообществах территории Ботанического сада СВФУ. Составлен список ДРКР, включающий 32 вида и представляющий пятую часть (20,9%) флоры Ботанического сада. Дикие родичи объединены в 24 рода и 11 семейств. Ведущие семейства – Poaceae (12), Fabaceae (5), общее число видов, сосредоточенных в этих семействах, составляет 50% всего списка ДРКР. Наиболее насыщенными родами являются Agrostis (3), Poa (3). Древесные растения в списке диких родичей культурных растений Ботанического сада СВФУ составляют 6,3% и представлены 2 видами (Crataegus dahurica и Rosa acicularis). На долю травянистых растений приходится 93,7% всего видового разнообразия ДРКР. Кроме того, 10 декоративных и лекарственных видов, относящихся к 10 родам и 9 семействам, входят в Дополнительный список ДРКР. Также рассмотрено участие диких родичей культурных растений в природных растительных сообществах территории Ботанического сада. Основным источником ДРКР здесь являются луговые и степные сообщества.

Ключевые слова: дикие родичи культурных растений, Ботанический сад СВФУ, флора, природные растительные сообщества, охрана биоразнообразия.

ДАНИЛОВА Надежда Софроновна – д.б.н., проф., в.н.с. Ботанического сада ИБПК СО РАН, акад. АН РС(Я), dan51@mail.ru.