



БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 574.23 : 574.24

А.Я. Тамахина, Ж.Р. Локьяева

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ДЕВЯСИЛОМ БРИТАНСКИМ (*INULA BRITANNICA* L.) В РАЙОНАХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

А.Я. Tamakhina, Zh.R. Lokyaeva

FEATURES OF HEAVY METALS ACCUMULATION IN WILLOW LEAF INULA (*INULA BRITANNICA* L.) IN AREAS WITH VARIOUS EXTENT OF TECHNOGENIC POLLUTION

А.Я. Тамахина – д-р с.-х. наук, проф. каф. плодоовощеводства и виноградарства Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова, г. Нальчик. E-mail: aida17032007@yandex.ru

Ж.Р. Локьяева – асп. каф. товароведения и туризма Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова, г. Нальчик. E-mail: aida17032007@yandex.ru

А.Я. Tamakhina – Dr. Agr. Sci., Prof., Chair of Merchandizing and Tourism, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after M. Kokov, Nalchik. E-mail: aida17032007@yandex.ru

Zh.R. Lokyaeva – Postgraduate Student, Chair of Merchandizing and Tourism, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, Nalchik. E-mail: aida17032007@yandex.ru

С целью расширения представления о пределах выносливости и адаптации к стресс-факторам представителей рода *Inula* L. было проведено исследование особенностей накопления и усвоения тяжелых металлов фитомассой растений в районах Кабардино-Балкарской Республики. В условиях умеренного техногенного загрязнения надземная фитомасса *Inula britannica* L. накапливает тяжелые металлы (Cu, Zn, Pb, Cd) в большей степени, чем подземная. В условиях сильного техногенного загрязнения тяжелые металлы распределяются в фитомассе более равномерно. При этом степень биологического накопления тяжелых металлов снижается. В районах с умеренным техногенным загрязнением накопление тяжелых металлов фитомассой снижается от кадмия к меди ($Cd > Zn > Pb > Cu$), а в условиях сильного техногенного загрязнения – от кадмия к свинцу ($Cd > Cu > Zn > Pb$). Транслокационный коэф-

фициент при умеренном загрязнении почвы снижается от цинка к свинцу ($Zn > Cu > Cd > Pb$), а при сильном – от кадмия к меди ($Cd > Zn > Pb > Cu$). Фитотоксичность молибдена в ценопопуляции *Inula britannica* L. проявляется при концентрации металла более 100 мг/кг почвы. Молибден аккумулируется преимущественно корневища-ми и корнями растений. Показателями биоиндикации содержания молибдена в токсичных концентрациях являются высота побега, диаметр стебля, количество листьев и корзинок. Высокий транслокационный коэф-фициент кадмия наряду со значительным потенциалом семенного и вегетативного размножения делают *Inula britannica* L. перспективным для фиторемедиации загрязненных кадмием земель. Учитывая высокую вероятность фоллиарного загрязнения свинцом и кадмием надземной фитомассы *Inula britannica* L., участки для заготовки сырья следует

выбирать вне зон влияния автомобильных дорог и интенсивного промышленного производства.

Ключевые слова: *Inula britannica* L., тяжелые металлы, техногенное загрязнение, биологическое накопление, транслокационный коэффициент.

For the purpose of expansion of idea of endurance and adaptation limits to stress factors of the sort *Inula* L. representatives the research of features of heavy metals accumulation and digestion by the phytomass of plants in the regions of Kabardino-Balkar Republic was conducted. In the conditions of moderate technogenic pollution elevated phytomass of *Inula britannica* L. accumulates heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd) more than underground phytomass. In the conditions of strong technogenic pollution heavy metals are distributed in phytomass more evenly. Thus extent of biological accumulation of heavy metals decreases. In the area with moderate technogenic pollution accumulation of heavy metals phytomass decreases from cadmium to copper (Cd>Zn>Pb>Cu), and in the conditions of the strong technogenic pollution from cadmium to lead (Cd>Cu>Zn>Pb). Coefficient of heavy metals phytomass of *Inula britannica* L. translocation at moderate pollution of the soil decreases from zincum to lead (Zn>Cu>Cd>Pb), and at strong from cadmium to copper (Cd>Zn>Pb>Cu). Phytotoxicity of a molybdenum in a tsenopopulation of *Inula britannica* L. is shown at concentration of metal more than 100 mg/kg of the soil. Molybdenum accumulates mainly rhizomes and roots of plants. Indicators of bioindication of the maintenance of molybdenum in toxiferous concentration are the escape height, diameter of a stalk, quantity of leaves and baskets. The high translocational coefficient of cadmium along with the considerable potential of seed and vegetative reproduction is done by *Inula britannica* L. perspective for a fitoremediation of the lands polluted by cadmium. Considering high probability of the air and sheet pollution by lead and cadmium of elevated phytomass of *Inula britannica* L., sites for preparation of raw materials should be chosen out of zones of influence of highways and the intensive industrial production.

Keywords: *Inula britannica* L., heavy metals, technogenic pollution, biological accumulation, translocational coefficient.

Введение. Девясил британский (*Inula britannica* L.) на Северном Кавказе произрастает повсеместно [1] и наряду с девясилем германским (*Inula germanica* L.) и высоким (*Inula helenium* L.) относится к евро-сибирским географическим элементам бореального геотипа флоры Кабардино-Балкарской Республики (КБР) [2]. Виды данного геоэлемента характеризуются более или менее выровненным распространением в ксерофильных сообществах и лесных фитоценозах.

Девясил британский как вид многоцелевого хозяйственного использования применяется в медицине (в т.ч. в ветеринарной), декоративном растениеводстве, пищевой промышленности, пчеловодстве. Надземная часть *Inula britannica* L. содержит эфирные масла, дубильные вещества, фенолкарбоновые кислоты, кумарины, флавоноиды, тритерпеноиды, стероиды. В корневищах и корнях обнаружены инулин, алкалоиды, эфирное масло [3].

Широкое применение девясила британского делает актуальным исследование экологической чистоты его сырья, в частности по тяжелым металлам, в условиях техногенного загрязнения. Главными источниками загрязнения окружающей среды молибденом, вольфрамом и другими тяжелыми металлами в КБР являются хвостохранилища и отвалы Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (ТВМК). К источникам загрязнения окружающей среды свинцом, кадмием, медью, цинком относятся промышленные предприятия, автотранспортные средства, коммунальные хозяйства республики.

Цель исследования. Изучить особенности накопления и усвоения тяжелых металлов фитомассой растений в районах с контрастной степенью техногенного загрязнения, что расширяет представление о пределах выносливости и адаптации к стресс-факторам представителей рода *Inula* L. в КБР.

Объекты и методы исследования. Полевые работы проводились в последней декаде августа 2014–2015 гг. Пробы растений отбирали в период массового цветения с трех площадок в пяти повторностях: P1 (контроль) – городской парк им. Атажукина (г. Нальчик); P2 – средняя терраса хвостохранилища ТВМК; P3 – берег

пруда-отстойника хвостохранилища ТВМК. Глубина отбора почвенных образцов – 10–15 см. Повторность трехкратная. Особенности накопления меди, цинка, свинца и кадмия фитомассой девясила британского изучали на участках Р1 и Р2, молибдена – на всех участках.

В ценопопуляциях девясила британского определяли морфометрические показатели растений: высота побега, диаметр стебля, количество листьев, корзинок, язычковых цветков, длина и ширина листа, диаметр корзинки, масса 1000 семян. Для оценки внутривокупляционной изменчивости морфологических признаков использовался коэффициент вариации (CV, %). Достоверность различий между ценопопуляциями оценивали наименьшей существенной разностью (НСР₀₅) [4].

Содержание тяжелых металлов (ТМ) в пробах почвы и растений определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (прибор МГА-915). Предварительно пробы были минерализованы с использованием СВЧ-минерализатора «Минотавр-2» [5]. Фоновые концентрации ТМ в почве Р1 считали равными: *Cu* – 11; *Zn* – 29; *Pb* – 15; *Cd* – 0,1; *Mo* – 1,1 мг/кг [6]. Для оценки степени концентрации ТМ в растениях рассчитывали: 1) коэффициент биологического накопления (КБН) – отношение содержания химического

элемента в золе растений к его валовому содержанию в почве; 2) транслокационный коэффициент (КТ) – отношение содержания элемента в надземной фитомассе к его содержанию в корнях [7].

Результаты исследования и их обсуждение. Почва контрольного участка – чернозем обыкновенный карбонатный суглинистого механического состава, рН=6,6–6,8. Почвы хвостохранилища щелочные (рН=7,9–9,3). В профиле почвы Р2 имеется сформированный почвенный слой 1–2 см, ниже – слой золотых наносов высохшей пульпы (5 см), под ним слой каменно-песчаного грунта (10–15 см). На участке Р3 отсутствует сформированный почвенный покров, субстрат представлен в основном каменно-песчаным грунтом.

В почве районов исследования установлено превышение естественного фона по кадмию (Р1, Р2, Р3), меди, цинку и молибдену (Р2, Р3), свинцу (Р3). Концентрация *Cu*, *Zn*, *Pb* и *Mo* в почве Р2 превышает контроль соответственно в 3,2; 17,5; 1,7 и 56,4 раза. Почва участка Р3 загрязнена ТМ в наибольшей степени. Здесь концентрация *Cu*, *Zn*, *Pb* и *Mo* превышает контроль соответственно в 9,3; 40,3; 4,5 и 92,7 раза (табл. 1).

Таблица 1

Валовое содержание ТМ в почве районов исследования, мг/кг

Участок	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Pb</i>	<i>Cd</i>	<i>Mo</i>
Р1	4,3	5,7	4,2	0,24	1,1
Р2	14	100	7	0,23	62
Р3	40	230	19	0,23	102

Ценопопуляция девясила британского на участке Р1 занимает площадь 20 м² с плотностью растений 20 шт/м²; на участке Р2 – площадь 2,5 м², плотность особей 12 шт/м². На берегу пруда-отстойника (Р3) площадь ценопопуляции девясила британского – 0,8 м², плотность – 6 шт/м². Анализ морфометрических параметров ценопопуляций выявил отсутствие внешних проявлений фитотоксичности ТМ, в первую очередь молибдена, на участке Р2, где отмечается превышение значений всех исследованных

морфометрических параметров растений по сравнению с контролем (табл. 2).

На участке Р3 отмечено достоверное снижение высоты растений, диаметра стебля, количества листьев и корзинок по сравнению с контролем. Значения остальных морфометрических параметров ценопопуляции близки к контролю, что свидетельствует об адаптации вида к стрессовым условиям. Так, при уменьшении количества корзинок по сравнению с контролем в 2,7 раза их диаметр возрастает в 1,4 раза, а масса 1000 семян увеличивается на 5 г. При

уменьшении количества листьев в 6,4 раза их длина и ширина достоверно увеличиваются.

В ценопопуляциях девясила британского установлена значительная степень внутривидовой изменчивости по высоте побега, ширине листа и количеству корзинок; средняя – по диаметру стебля, длине листа, массе 1000 се-

мян, незначительная – по количеству язычковых цветков. Количество листьев характеризуется средней изменчивостью на контрольном участке и значительной – на участках хвостохранилища. Диаметр корзинки имеет незначительную изменчивость в контроле и среднюю – в районе хвостохранилища (рис.).

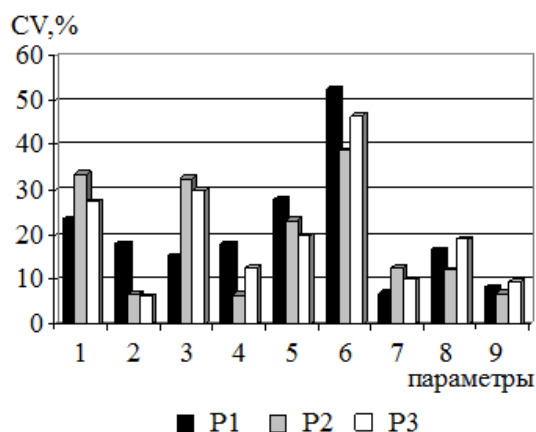
Таблица 2

Морфометрические параметры ценопопуляций *Inula britannica* L.

Показатель	P1	P2	P3	НСП ₀₅
Высота побега, см	20,8±3,5	44,5±10,7	17,3±3,4	5,64
Диаметр стебля, см	0,23±0,03	0,41±0,02	0,22±0,01	0,02
Кол-во листьев, шт.	90,0±10	120,0±28	14,0±3	10
Длина листа, см	2,3±0,3	4,2±0,2	3,3±0,3	0,9
Ширина листа, см	0,5±0,1	0,6±0,1	0,7±0,1	0,1
Кол-во корзинок, шт.	8,0±3	18,0±5	3,0±1	1,2
Диаметр корзинки, см	2,0±0,1	2,2±0,2	2,8±0,2	0,5
Масса 1000 семян, мг	83±10	92±8	88±12	4,8
Кол-во язычковых цветков, шт.	52±3	40±2	43±3	8,4

В условиях умеренного техногенного загрязнения (P1) ценопопуляции характеризуются высокой изменчивостью диаметра стебля, длины и ширины листа, количества корзинок. В условиях высокого загрязнения ТМ (P2) возрастает внутривидовая изменчивость по высоте побе-

га, количеству листьев и диаметру корзинки. В условиях повышенного техногенного загрязнения (P3) отмечена высокая изменчивость высоты побегов, количества листьев и язычковых цветков, массы 1000 семян.



Вариабельность морфометрических параметров ценопопуляций девясила британского:
 1 – высота побега; 2 – диаметр стебля; 3 – количество листьев; 4 – длина листа;
 5 – ширина листа; 6 – количество корзинок; 7 – диаметр корзинки; 8 – масса 1000 семян;
 9 – количество язычковых цветков

Содержание молибдена в надземной и подземной фитомассе девясила британского, произрастающего на участках P2 и P3, превышает

контроль соответственно в 1,9–2,3 и 31,1–33,9 раза. На почвах с низким содержанием молибдена (фон) аккумуляция данного металла

отмечена преимущественно в надземной фитомассе. В условиях геохимической аномалии концентрация молибдена в корневищах и кор-

нях в 7,1–8,2 раза превышает его содержание в листьях и стеблях (табл. 3).

Таблица 3

Оценка степени концентрации молибдена (мг/кг золы) в надземной (н) и подземной (п) фитомассе *Inula britannica* L.

Участок	Содержание молибдена, мг/кг		КБН		КТ
	н	п	н	п	
P1	7,22	3,55	6,56	3,23	2,03
P2	13,51	110,34	0,22	1,78	0,12
P3	16,83	120,47	0,16	1,18	0,14

При фоновом содержании молибдена в почве (P1) девясил британский в значительной мере проявляет способность к его биологическому накоплению фитомассой и транслокации по органам. В условиях геохимической аномалии (P2, P3) биологическое накопление и транслокационный коэффициент молибдена снижаются, что, по-видимому, связано с включением механизмов контроля концентрации молибдена в тканях и защиты от его чрезмерного накопления в надземной фитомассе. Фитотоксичность молибдена в ценопопуляции девясила британского проявляется при концентрации металла в почве более 100 мг/кг. Показателями биоиндикации содержания молибдена в токсичных для данного вида концентрациях являются высота побега, диаметр стебля, количество листьев и корзинок.

Концентрация молибдена в почве около 60 мг/кг не оказывает внешнего токсического эффекта на растения.

Полученные результаты согласуются с имеющимися данными по накоплению молибдена травянистыми растениями. Так, у бобовых и злаковых трав в районе ТВМК отмечено превышение содержания молибдена в надземной фитомассе по сравнению с чистой зоной в 6–15 раз без внешних признаков угнетения растений [8].

Концентрация *Cu*, *Zn*, *Pb* и *Cd* в надземных органах и подземной фитомассе девясила британского в исследованных районах находится в пределах ПДК. Исключение составляет кадмий, превышение содержания которого отмечено в надземной фитомассе растений P1 (табл. 4)

Таблица 4

Содержание ТМ в надземной (н) и подземной (п) фитомассе *Inula britannica* L., мг/кг

Металл	Район	Надземная фитомасса	Подземная фитомасса	ПДКн, мг/кг	ПДКп, мг/кг
Cu	P1	6,03	3,21	150	150
	P2	4,60	5,68		
Zn	P1	22,63	4,02	300	300
	P2	17,77	20,34		
Pb	P1	9,54	9,10	10*	6**
	P2	0,57	0,69		
Cd	P1	1,27	0,88	1*	1**
	P2	0,47	0,35		

* – по СанПиН 2.3.2.1078-01 для чая черного, зеленого, плиточного; ** – по СанПиН 2.3.2.1078-01 для БАД на растительной основе.

Девясил британский накапливает и усваивает ТМ в разной степени, зависящей от рН почвы. В слабокислых и нейтральных почвах (P1) подвижность *Cu*, *Zn*, и *Cd* значительно выше, чем в почвах с щелочной рН (P2). Независимо от рН подвижность *Pb* в почвах очень низкая. Следовательно, накопление растением *Pb* обусловлено в основном фолиарным поступлением (газы, дым, техногенная пыль), что особенно характерно для растений, произрастающих в загрязненном выхлопными газами автомобилей центре города (P1). Довольно высокая степень аккумуляции *Cd* без признаков угнетения растений девясила британского свидетельствует об избирательной способности этого вида поглощать *Cd* даже из незагрязненной почвы, компенсируя недостаток цинка. Дополнительным источником загрязнения *Cd* надземных органов *Inula britan-*

nica L. является фолиарное поступление с пылью, сажей, особенно вблизи автомобильных дорог.

В условиях умеренного техногенного загрязнения (P1) надземная фитомасса накапливает ТМ в большей степени, чем подземная. Более равномерно распределяются по органам растения *Pb* и *Cd*. В условиях высокого техногенного загрязнения значения КБН снижаются, что свидетельствует о том, что растение контролирует поступление ТМ, накапливая их в необходимом для жизнедеятельности количестве. В условиях умеренного техногенного загрязнения накопление ТМ фитомассой девясила британского снижается от кадмия к меди ($Cd > Zn > Pb > Cu$), а в условиях сильного техногенного загрязнения – от кадмия к свинцу ($Cd > Cu > Zn > Pb$) (табл. 5).

Таблица 5

Оценка степени концентрации ТМ в надземной (н) и подземной (п) фитомассе *Inula britannica* L. в районах исследования

Металл	Район исследования	КБН _н	КБН _п	КТ
Cu	P1	1,40	0,75	1,88
	P2	0,33	0,41	0,81
Zn	P1	3,97	0,70	5,63
	P2	0,18	0,20	0,87
Pb	P1	2,27	2,17	1,05
	P2	0,08	0,10	0,83
Cd	P1	5,29	3,67	1,44
	P2	2,04	1,52	1,34

В районе P1 транслокация ТМ снижается от цинка к свинцу ($Zn > Cu > Cd > Pb$), а в P2 – от кадмия к меди ($Cd > Zn > Pb > Cu$). Высокий КТ кадмия, независимо от типа почвы и степени загрязнения, а также способность к семенному и вегетативному размножению делают девясил британский перспективным для фиторемедиации загрязненных кадмием земель.

Выводы. Накопление тяжелых металлов фитомассой *Inula britannica* L. зависит от степени техногенного загрязнения почвы. В условиях умеренного техногенного загрязнения надземная фитомасса растения накапливает тяжелые металлы (*Cu*, *Zn*, *Pb*, *Cd*) в большей степени, чем подземная. В условиях сильного

техногенного загрязнения тяжелые металлы распределяются в фитомассе более равномерно. При этом коэффициент биологического накопления тяжелых металлов снижается. В условиях умеренного техногенного загрязнения накопление тяжелых металлов фитомассой девясила британского снижается от кадмия к меди ($Cd > Zn > Pb > Cu$), а в условиях сильного техногенного загрязнения – от кадмия к свинцу ($Cd > Cu > Zn > Pb$). Транслокационный коэффициент тяжелых металлов фитомассой девясила британского при умеренном загрязнении почвы снижается от цинка к свинцу ($Zn > Cu > Cd > Pb$), а при сильном – от кадмия к меди ($Cd > Zn > Pb > Cu$).

Фитотоксичность молибдена в ценопопуляциях *Inula britannica* L. проявляется при концентрации металла в почве более 100 мг/кг. Показателями биоиндикации содержания молибдена в токсичных для данного вида концентрациях являются высота побега, диаметр стебля, количество листьев и корзинок. Высокий транслокационный коэффициент кадмия наряду со значительным потенциалом семенного и вегетативного размножения свидетельствует о возможности использования девясила британского для фиторемедиации загрязненных кадмием земель.

Кабардино-Балкарскую Республику можно считать перспективным регионом для заготовки экологически безопасного сырья *Inula britannica* L. в районах с умеренной и слабой техногенной нагрузкой. Учитывая высокую вероятность фолиарного загрязнения надземной фитомассы девясила британского свинцом и кадмием, участки для заготовки сырья следует выбирать вне зон влияния автомобильных дорог и интенсивного промышленного производства.

Литература

1. Галушко А.И. Флора Северного Кавказа. Определитель. Т.3. – Ростов-н/Д: Изд-во Ростов. ун-та, 1980. – С. 175.
2. Шхагапсоев С.Х. Растительный покров Кабардино-Балкарии. – Нальчик: Тетраграф, 2015. – 352 с.
3. Растительные ресурсы СССР: цветковые растения, их химический состав, использование. Семейство Asteraceae (Compositae). – СПб.: Наука, 1993. – 352 с.
4. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
5. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / утв. Минсельхозом РФ 10.03.1992. – URL: <http://base.consultant.ru> (дата обращения: 10.01.2016).
6. Реутова Т.В., Воробьева Т.И., Жинжакова Л.З. Фоновые концентрации тяжелых металлов и неорганических соединений азота в почвах основных экосистем Центрального Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений: мат-лы

Междунар. науч. конф. – Владикавказ: Терек, 2010. – С. 1–4.

7. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. – М.: Астрея-2000, 1999. – 341 с.
8. Реутова Т.В., Реутова Н.В., Цепкова Н.Л. Сравнительная характеристика посттехногенного и фонового ландшафтов в районе северной депрессии Центрального Кавказа // Устойчивое развитие горных территорий: проблемы и перспективы интеграции науки и образования: мат-лы Междунар. конф. – Владикавказ: Терек, 2004. – С. 262–264.

Literatura

1. Galushko A.I. Flora Severnogo Kavkaza. Opredelitel'. T.3. – Rostov-n/D: Izd-vo Rostov. un-ta, 1980. – S. 175.
2. Shhagapsoev S.H. Rastitel'nyj pokrov Kabardino-Balkarii. – Nal'chik: Tetragraf, 2015. – 352 s.
3. Rastitel'nye resursy SSSR: cvetkovye rastenija, ih himicheskij sostav, ispol'zovanie. Semejstvo Asteraceae (Compositae). – SPb.: Nauka, 1993. – 352 s.
4. Dospheov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoj obrabotki rezul'tatov issledovanij). – M.: Agropromizdat, 1985. – 351 s.
5. Metodicheskie ukazanija po opredeleniju tjazhelyh metallov v pochvah sel'hozugodij i produkcii rastenievodstva / utv. Minsel'hozom RF 10.03.1992. – URL: <http://base.consultant.ru> (data obrashhenija: 10.01.2016).
6. Reutova T.V., Vorob'eva T.I., Zhinzhakova L.Z. Fonovye koncentracii tjazhelyh metallov i neorganicheskijh soedinenij azota v pochvah osnovnyh jekosistem Central'nogo Kavkaza // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij v uslovijah global'nyh izmenenij: mat-ly Mezhdunar. nauch. konf. – Vladikavkaz: Terek, 2010. – S. 1–4.
7. Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geo-himija landshafta. – M.: Astreja-2000, 1999. – 341 s.
8. Reutova T.V., Reutova N.V., Cepkova N.L. Sravnitel'naja harakteristika posttehnogennoho i fonovogo landshaftov v rajone severnoj depressii Central'nogo Kavkaza // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij: problemy i perspektivy integracii nauki i obrazovanija: mat-ly Mezhdunar. konf. – Vladikavkaz: Terek, 2004. – S. 262–264.