

ОБЩАЯ БИОЛОГИЯ

Экология

УДК 581.526.55.551.34 : 581.6

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257

Оценка безопасности оленьих пастбищ Авамской тундры по содержанию тяжелых металлов в вегетативных органах растений

Т.А. Турчина*, З.А. Янченко

НИИ сельского хозяйства и экологии –
филиал «ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН», Норильск, Россия

*tatturchina@mail.ru

Аннотация. Изменение путей миграции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L.) актуализировало проблему использования пастбищных угодий Авамской тундры (юг полуострова Таймыр) для развития домашнего оленеводства. Оно возможно лишь при условии безопасности ресурса кормовых растений. Объектом исследований явилась вегетирующая надземная фитомасса наиболее используемых в пищу растений (лишайники, пушица, осока, кустарники). Методом пиролиза на атомно-абсорбционном анализаторе РА-915+ установлены элементный состав и концентрация тяжелых металлов. Оценка безопасности пастбищ дана на основе сравнения полученных данных с установленным значением временного максимально допустимого уровня (МДУ) содержания химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных. Выявленная высокая вариабельность концентраций элементов ($v = 21,8\text{--}96,6\%$) обусловлена биологическими особенностями исследуемых видов. Максимальное содержание элементов I класса опасности (As, Hg, Pb) выявлено в талломе лишайников (род *Cladonia*). Независимо от таксономического положения вида, на долю трех химических элементов – Mn, Cu, Ni – приходится от 96,88 до 99,97 % от валового содержания их водорастворимых форм. Из исследуемого перечня элементов в растениях фактическая концентрация никеля (за исключением травянистых видов) и хрома (за исключением кустарников) превышает максимально допустимый уровень содержания, установленный для кормов сельскохозяйственных животных, в 1,1–1,9 и 1,1–2,1 раза соответственно. С учетом особенностей регионального геохимического фона, фактическое содержание тяжелых металлов в кормовых растениях не является опасным, территория Авамской тундры пригодна для развития домашнего оленеводства.

Ключевые слова: олени пастбища, растения, тяжелые металлы, концентрация, максимально допустимый уровень содержания, безопасность кормов

Введение

Авамская тундра – территория площадью более 1,5 млн га (15,2 тыс. км²) расположена в южной части полуострова Таймыр (юг Северо-Сибирской низменности), включает водоразделы рек Хета и Дудыпта (правый приток р. Пясины). Исследуемый район находится на границе природных зон – южной тундры и лесотундры Восточной Сибири (рис. 1) и на протяжении длительного времени использовался таймырской популяцией дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L.) в качестве пастбищных угодий.

С начала XXI в. вследствие меняющихся климатических условий, возрастающего хозяйственного освоения устья р. Енисей (строительство газопровода, новых автомобильных дорог с твердым покрытием, продление навигации с помощью ледокольного флота) и браконьерского промысла миграционные потоки стад сдвинулись к югу и юго-востоку – в Эвенкию, Западную Якутию [1, 2]. «Освободившиеся» таким образом пастбищные угодья с достаточно высоким ресурсом кормовых растений можно адаптировать для тех же целей, но при контролируемом использовании, – домашнего оленеводства.

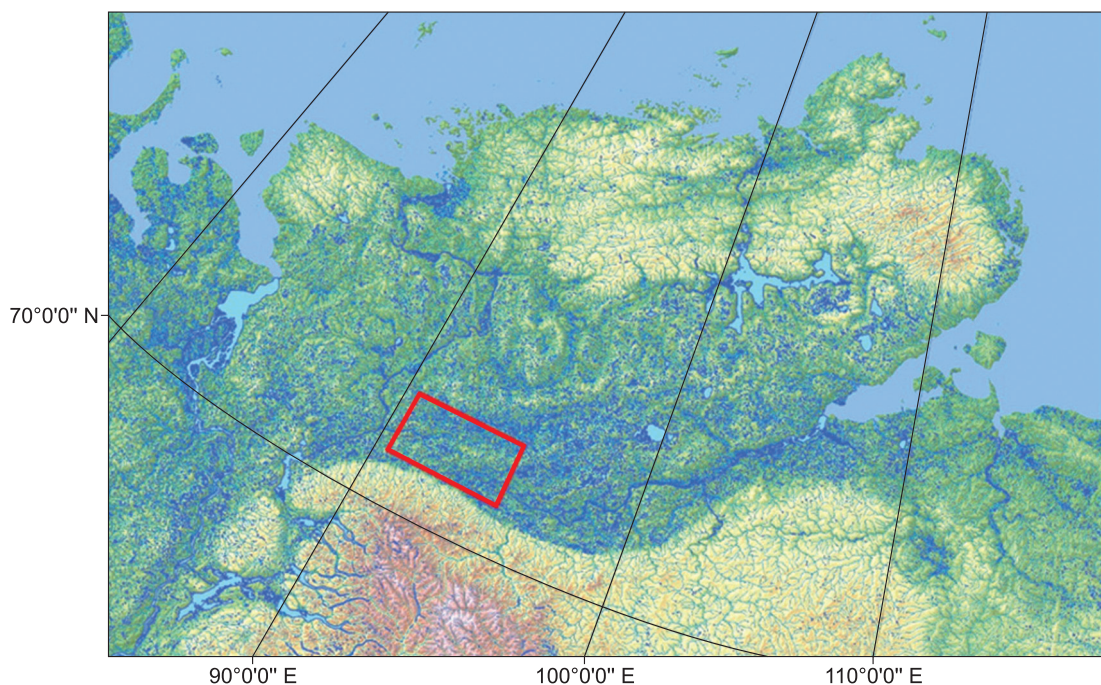


Рис. 1. Территория Авамской тундры на карте полуострова Таймыр.

Fig. 1. The territory of the Avam tundra on the map of the Taimyr Peninsula.

Последнее как отрасль сельского хозяйства играет существенную роль в обеспечении населения северных регионов мясом и продуктами его переработки. Безопасность продукции зависит, в первую очередь, от безопасности кормов и, прежде всего, содержания тяжелых металлов – элементов, способных изменять направление биохимических процессов в растительных тканях.

Цель работы – на основе данных об элементном составе тяжелых металлов и их концентраций в кормовых растениях обосновать возможность безопасного использования территории Авамской тундры для домашнего оленеводства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявить элементный состав тяжелых металлов в вегетативных органах основных кормовых растений, определить валовое содержание и концентрацию каждого элемента;
- установить таксономические и межвидовые особенности накопления тяжелых металлов в растениях;
- сравнить фактическое содержание тяжелых металлов в растениях с нормированными показателями;
- дать заключение о возможности использования ресурса кормовых растений Авамской тундры для целей домашнего оленеводства.

Объект и методика исследования

Из порядка 40 видов растений, составляющих рацион питания северного оленя, предпочтительными являются лишайники, пушица, осока, кустарники [1]. Их вегетирующая надземная фитомасса явилась объектом исследования. Отбор проб растительности произведен на трех ключевых участках, расположенных в разных частях Авамской тундры и охватывающих наиболее типичные растительные сообщества (табл. 1).

Участок 1 (АВАМ 1) расположен в верховьях р. Нерпалах (бассейн р. Хета) на водоразделе рек Хета и Авам с преобладающим типом растительности – лиственничная лесотундра. Местоположение участка 2 (АВАМ 2) – водосбор р. Дудыпта между местом впадения в нее рек Батайка и Авам в подзоне южных тундр. Участок 3 (АВАМ 3) расположен на водосборной площади р. Кыстыктах недалеко от места впадения ее в р. Дудыпта; также относится к южным тундрам, но, в отличие от предыдущего участка, с более высоким разнообразием сосудистых растений [3].

В зависимости от принадлежности вида к определенному таксону и с учетом преимущественного использования в рационе оленей для аналитических целей использовалась вегетирующая надземная часть (травянистые растения),

Т а б л и ц а 1

Характеристика объекта исследования

Table 1

Characteristics of the study object

Река (бассейн) River (basin)	Шифр объекта, географические координаты угловых точек Object code, geographic coordinates of corner points	Растительное сообщество Plant community	Характеристика видов растений Characteristics of plant species		
			Русское название вида Russian name of the species	Латинское название вида Latin name of the species	Наименование вегетативных органов для анализа Name of vegetative organs for analysis
Кыстыктах (Дудыпта в устьевой части) Kystyktakh (Dudypta in the mouth part)	АВАМ 3 N70° 56' – 70° 58' E91° 14' – E91° 19' АВАМ 3	Тундра пятнистая	Ива красивая	<i>Salix pulchra</i>	Лист
		Тундра пятнистая	Береза карликовая	<i>Betula nana</i>	Лист
		Болото полигональное	Лишайники рода Кладония	<i>Cladonia arbuscula</i> <i>Cladonia rangiferina</i>	Слоевиде (таллом)
		Болото полигональное	Пушица влагалищная	<i>Eriophorum vaginatum</i>	Надземная фитомасса (вегетирующая)
Батайка (Дудыпта в среднем течении) Bataika (Dudypta in the middle course)	АВАМ 2 N71° 12' – 71° 13' E92° 35' – E92° 41' АВАМ 2	Тундра пятнистая	Осока арктико-сибирская	<i>Carex arctosibirica</i>	Надземная фитомасса (вегетирующая)
		Тундра ивовая злаково- осоковая	Осока буроватенькая	<i>Carex fuscicula</i>	Лист
		Тундра кустарничково- лишайниковая	Ива сизая	<i>Salix glauca</i>	Слоевиде (таллом)
Нерпалах (Хета) Nerpalkh (Kheta)	АВАМ 1 N71° 03' – 71° 04' E93° 41' – E93° 44' АВАМ 1	Ерник хвощово-злаковый	Ива мохнатая	<i>Salix lanata</i>	Лист
		Ерник хвощово-осоковый	Береза карликовая	<i>Betula nana</i>	Лист

Общая характеристика тяжелых металлов

Table 2

General characteristics of heavy metals

Характеристика Characteristic	Мышьяк Arsenic	Ртуть Mercury	Свинец Lead	Марганец Manganese	Медь Copper	Никель Nickel	Хром Chromium
Обозначение Symbol	As	Hg	Pb	Mn	Cu	Ni	Cr
Атомная масса Atomic mass	74,92	200,59	207,19	54,938	63,546	58,71	51,996
Класс опасности Hazard Class	I	I	I	III	II	II	II
Временный МДУ*, мг/кг Temporary MDU, mg/kg	0,5	0,05	5,0	Отсутствует	30,0	3,0	0,5
Физиологическая роль** Physiological role	К	К	К	З, МЭ	МЭ	МЭ	Н/О

Примечание. «*» – МДУ – максимально допустимый уровень для грубых и сочных кормов; «**» – К – канцероген, З – зольный элемент; МЭ – микроэлемент, Н/О – не определена.

Notes. «*» – MDU – the maximum allowable level for rough and succulent feed; «**» – К – carcinogen, З – ash element; МЭ – microelement, Н/О – not determined.

листья (кустарники), вся надземная фитомасса (слоевище лишайников). В полевых условиях отбор проб растительных образцов и их дальнейшая подготовка к анализу, пакетирование и т. д. (с учетом предъявляемых требований) произведены в соответствии с методикой геоботанических исследований [4]. Выполнено определение концентрации семи химических элементов, имеющих разную степень опасности для окружающей среды (табл. 2).

Содержание ртути определялось методом пиролиза на атомно-абсорбционном анализаторе РА-915+ с приставкой РП-91С, остальных элементов – методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой [5] на эмиссионном спектрометре модели iCAP 6300 Duo. Минимально определяемая концентрация химических элементов составляет 0,1 мг/кг. Полученные значения сравнивались между видами в пределах одного водосбора и внутри вида на разных водосборах. Различие полученных значений оценивали по критерию Стьюдента для вероятности безошибочного определения 95 %. Математико-статистическая обработка данных проведена с использованием средств электронной таблицы Microsoft Excel и в соответствии с требованиями, предъявляемыми к работам подобного рода [6].

Фактическая оценка концентрации тяжелых металлов в вегетативных органах растений по их безопасности для диких животных (северного оленя, прежде всего) не может быть дана, так как для дикорастущих растений региона нормированные показатели содержания тяжелых металлов (ПДК) отсутствуют.

В настоящее время в Российской Федерации нормируется концентрация химических элементов, содержащихся в кормах для сельскохозяйственных животных [7, 8]. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) разработан для нескольких химических элементов, преимущественно микроэлементов и тяжелых металлов I и II класса опасности. Для элементов III класса опасности и элементов, которые подобным образом не классифицируются (являются неопасными для почв и растений) МДУ не разработаны (см. табл. 2).

В связи с тем, что исследуемые виды растений (см. табл. 1) являются кормовой базой северных оленей и других видов животных, повышенные концентрации опасных элементов впоследствии могут быть аккумулированы в животных тканях и оказаться в продуктах питания человека, для целей настоящего исследования в качестве контроля (эталона сравнения) использован по-

казатель временного максимально допустимого уровня (МДУ) содержания химических элементов, установленные для грубых и сочных кормов [7, 8]. Заключение о безопасности вегетативных органов растений как кормового ресурса дано на основе сравнения с временным МДУ содержания химического элемента (см. табл. 2).

Результаты и обсуждение

В растительных тканях тяжелые металлы находятся в виде водорастворимых форм и, в зависимости от концентрации, могут как проявлять канцерогенные свойства, так и положительно влиять на ход метаболических процессов (выступают в роли микроэлементов) [9–11]. В фитомассе исследуемых видов растений содержание каждого элемента, соотношение между концентрациями элементов видоспецифично и зависит от их способности аккумулировать тот или иной элемент (табл. 3). Межвидовые различия валового содержания тяжелых металлов достигает трех порядков значений и варьируется в диапазоне от 91,89 мг/кг (лишайники) до 2708,435 мг/кг (береза).

Степень варьирования концентрации для каждого элемента различна (табл. 3). Величина коэффициента вариации менее 33 % связана с преобладанием значений меньше минимально определяемой величины (мышьяк) и указывает на однородный источник поступления этих элементов в растения, независимо от биологических особенностей вида (медь, никель). Высокая вариабельность концентраций других металлов ($v = 49,7\%$ – свинец, $v = 73,9\%$ – хром, $v = 96,63\%$ – марганец) в условиях однородной подстилающей поверхности (почва) обусловлена, прежде всего, биологическими особенностями изучаемых видов.

Максимальное значение валового содержания тяжелых металлов выявлено у березы (1409,95–2708,435 мг/кг) и некоторых видов ив (616,043–1210,247 мг/кг). У одних и тех же видов различие валовых концентраций может быть обусловлено особенностями локального геохимического фона (повышенные концентрации отдельных элементов в почвенном покрове), удаленностью от источников дополнительной эмиссии загрязняющих веществ, содержащих указанные металлы. В частности, валовое содержание элементов в листьях березы карликовой, собранных на участке, территориально расположенном ближе к Норильскому промышленному району (АВАМ 3),

почти в 2 раза меньше в сравнении с участком, территориально удаленным от него (АВАМ 1) – 1409,95 мг/кг и 2708,435 мг/кг соответственно. Содержащиеся в аэротехногенных загрязнителях вещества могут не только аккумулироваться в больших количествах в растительных тканях, но и выступать в роли ингибитора, препятствуя извлечению некоторых элементов из почвенного раствора.

В листьях березы карликовой (участок АВАМ 3) валовое содержание элементов почти в два раза меньше за счет уменьшенной концентрации марганца. Ингибирование аккумуляции марганца происходит на фоне увеличения концентрации других тяжелых металлов, в сравнении с участком АВАМ 1: меди – в 1,1 раза, никеля – в 1,3 раза, хрома – в 1,1 раза. Увеличение, как видно, небольшое, статистически незначимое ($t_{\phi(Cu)} = 0,27$; $t_{\phi(Ni)} = 0,47$; $t_{\phi(Cr)} = 0,37 < t_{95} = 2,45$), но достаточное для того, чтобы у березы способность к аккумуляции марганца снизилась.

Несмотря на различия концентраций тяжелых металлов в вегетативных органах растений и их валового содержания, обусловленные биологическими особенностями видов, тенденции соотношения элементов в валовом составе в целом и в пределах однородных таксонов, независимо от территориального местоположения объектов, идентичны (см. табл. 3).

Преобладающим элементом во всех растениях является марганец, доля его в элементном составе составляет 98,1–99,7 % от валового содержания – в сосудистых растениях и 88,1–94,3 % – у лишайников. Второе место по доле участия занимает медь: 0,1–1,0 % – у сосудистых растений, 3,0–4,9 % – у лишайников; третье место занимает никель – 0,2–0,8 % – у сосудистых растений, 1,7–3,9 % – у лишайников. Таким образом, на долю трех ведущих элементов – марганец, медь, никель – приходится до 99,9 % валового их содержания.

Геохимические ряды (расположение элементов по мере увеличения доли участия в валовом содержании) имеют практически идентичный вид:

$As < Hg < Pb < Cr < Ni < Cu < Mn$ – у сосудистых растений;

$Hg < As < Cr < Pb < Ni < Cu < Mn$ – у лишайников.

В сравнении с сосудистыми растениями у лишайников в большем количестве накапливаются мышьяк и свинец.

Т а б л и ц а 3

Концентрация и валовое содержание тяжелых металлов (Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Hg, As) в растительных образцах

Table 3

Concentration and total content of heavy metals (Mn, Cu, Ni, Pb, Cr, Hg, As) in plant samples

Бассейн реки (шифр объекта) River basin (object code)	Вид растений Plant species	Концентрация тяжелых металлов, мг/кг Concentration of heavy metals, mg/kg						Валовое содержание, мг/кг Total content, mg/kg
		As	Hg	Pb	Mn	Cu	Ni	Cr
Кыстыгах (АВАМ 3) Kustuktakh (AVAM 3)	Ива красивая	<0,1	<0,1	<0,1	610±180	2,7±0,5	3,2±1,1	0,143±0,03
	Береза карликовая	<0,1	<0,1	<0,1	1400±400	4,1±0,8	5,7±2,0	0,15±0,03
	Лишайники (Кладония)	0,22±0,11	<0,1	1,09±0,27	210±60	6,7±1,3	3,8±1,3	0,84±0,17
	Пушица влагалищная	<0,1	<0,1	0,87±0,22	510±150	5,4±1,1	2,3±0,8	0,53±0,11
Багайка (АВАМ 2) Batauka (AVAM 2)	Осоки (арктосибирская, бороватенькая)	<0,1	<0,1	0,36±0,09	470±140	5,7±1,1	2,1±0,7	0,63±0,13
	Ива сизая	0,15±0,07	<0,1	<0,1	430±130	3,8±0,8	3,5±1,2	0,56±0,11
	Лишайники (Кладония)	0,23±0,12	<0,1	1,5±0,4	81±24	4,5±0,9	3,6±1,3	1,06±0,21
	Ива мохнатая	<0,1	<0,1	<0,1	1200±400	5,3±1,1	4,8±1,7	0,147±0,03
Нерпалах (АВАМ 1) Nerpalkh (AVAM 1)	Береза карликовая	<0,1	<0,1	<0,1	2700±800	3,8±0,8	4,5±1,6	0,135±0,03

Данные статистической обработки

Statistical data		Фактическая концентрация меньше минимально определяемой величины The actual concentration is less than the minimum detectable value					
Среднее значение, мг/кг Average value, mg/kg	0,2	0,955	845,67	4,67	3,72	0,466	855,01
Дисперсия Dispersion	0,0019	0,2255	667786,5	1,4825	1,334	0,119	667117,3
Стандартное отклонение Standard deviation	0,044	0,475	817,18	1,218	1,155	0,344	816,772
Коэффициент вариации (v), % Coefficient of variation (v), %	21,8	49,7	96,6	26,1	31,0	73,9	95,5
Ошибка определения средней величины, ± мг/кг Error in determining the average value, ± mg/kg	0,03	0,24	272,39	0,41	0,39	0,11	272,26

Среди определяемых тяжелых металлов явными канцерогенными свойствами обладают мышьяк, ртуть, свинец (I класс опасности); вещества, относящиеся ко II–III классам опасности (медь, никель, марганец), в мизерных концентрациях обладают микроэлементной активностью; физиологическая роль хрома до настоящего времени не установлена [11].

Наименьшее значение максимально допустимого уровня (МДУ) содержания установлено для ртути – 0,05 мг/кг [7]. Применявшаяся методика определения этого элемента позволяет фиксировать его наличие в концентрации более 0,01 мг/кг, т. е. в 2 раза превышающую МДУ. Поскольку в вегетативных органах всех растений, независимо от их таксономической принадлежности, фактическая концентрация ртути была меньше минимально определяемой величины (см. табл. 3), имеющийся кормовой ресурс можно считать безопасным.

Из других элементов, относящихся к I классу опасности, мышьяк выявлен в трех образцах с диапазоном варьирования концентрации от 0,15 до 0,23 мг/кг, свинец – в четырех образцах с диапазоном значений от 0,36 до 1,5 мг/кг (см. табл. 3). В остальных образцах концентрация этих элементов была меньше, чем минимальный предел их определения в соответствии с установленной методикой.

В способности аккумулировать мышьяк и свинец проявляются таксономические особенности видов: оба эти элемента в больших количествах накапливаются в талломе лишайников. В частности, в сравнении с листьями кустарников (ива сизая), концентрация мышьяка в 1,5 раза больше. Наличие свинца, кроме лишайников, выявлено в вегетирующей надземной фитомассе травянистых видов, но в талломе лишайников концентрация элемента в 1,3 раза больше, чем в пушице, и в 3,0 раза больше, чем в осоке. В границах одной водосборной территории статистически значимые межвидовые различия концентраций свинца выявлены у лишайника с осокой ($t_{\phi} = 2,56 > t_{95} = 2,45$). В остальных вариантах сравнения различия концентраций статистически значимыми не являются ($t_{\phi} = 0,63 - 2,14 < t_{95} = 2,45$). Внутривидовые различия (лишайники) концентрации свинца в границах разных водосборов (реки Кыстыктах и Батайка) незначительны ($t_{\phi} = 0,85 < t_{95} = 2,45$).

Максимально допустимый уровень (МДУ) содержания указанных тяжелых металлов состав-

ляет 0,5 мг/кг – для мышьяка, 5,0 мг/кг – для свинца. В вегетативных органах всех изученных растений фактические концентрации этих тяжелых металлов показатели МДУ не превысили.

Наиболее высокие концентрации элемента (от 81 до 2700 мг/кг) и наибольшая доля в валовом содержании водорастворимых форм выявлены у марганца (см. табл. 3, рис. 2). В границах изученных водосборов рек Кыстыктах, Батайка, Нерпалах указанная особенность характерна для всех видов растений. Различия концентраций и максимальный показатель варьирования ($v = 96,63\%$) свидетельствуют о наличии биологических особенностей видов к аккумуляции этого элемента. Минимальные концентрации марганца выявлены у лишайников рода *Cladonia* (81–210 мг/кг), максимальные – у березы (1400–2700 мг/кг). Остальные виды занимают «промежуточное» между лишайниками и березой положение, концентрация элемента в их вегетативных органах изменяется в диапазоне от 430 до 1200 мг/кг. Таким образом, изученные растения по мере увеличения концентрации марганца образуют следующий ряд: кладония < осока < пушица < ивы < береза.

Если способность растений рода *Betula* к аккумуляции повышенных доз марганца известна давно (так называемые растения марганефилы), то, анализируя содержание элемента у разных видов рода *Salix*, отмечаем, что по абсолютной величине концентрации (1200 мг/кг) к числу растений-марганефилов можно отнести иву мохнатую (*Salix lanata*). В сравнении с другими видами растений она имеет статистически значимые различия концентраций ($t_{\phi} = 2,79 > t_{95} = 2,45$). Различия между видами внутри рода *Salix* статистически значимыми не являются ($t_{\phi} = 1,35 - 1,83 < t_{95} = 2,45$).

Марганец относится к элементам III класса опасности (малоопасные вещества), и МДУ его содержания не установлен, поэтому оценка безопасности растительного корма по величине фактических концентраций невозможна.

Медь в вегетативных органах исследуемых видов растений выявлена в концентрациях от 2,7 до 5,7 мг/кг (см. рис. 2). Среди перечня выявленных тяжелых металлов медь характеризуется наименьшим варьированием концентраций ($v = 26,1$). Это означает отсутствие биологических и таксономических различий видов в проявлении особенностей аккумуляции этого элемента (все изученные виды этой способностью обладают при-

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ОЛЕНЬИХ ПАСТБИЩ АВАМСКОЙ ТУНДРЫ

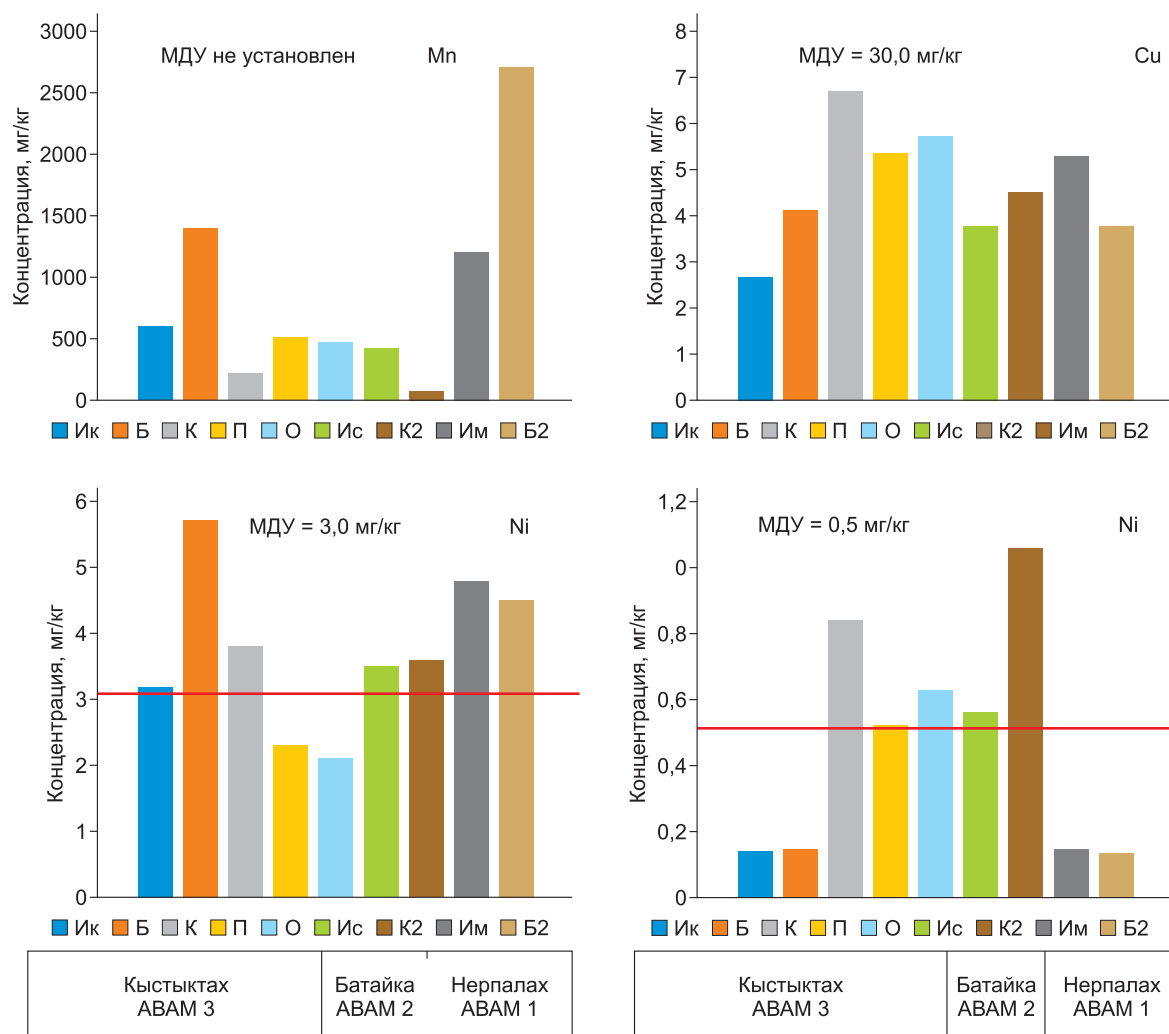


Рис. 2. Концентрация тяжелых металлов в вегетативных органах растений.

Ик – ива красивая, Б – береза карликовая, К – кладонии, П – пушица влагалищная, О – осоки, Ис – ива сизая, Им – ива мохнатая.

Fig. 2. The concentration of heavy metals in the plants vegetative organs.

Ик – beautiful willow, Б – dwarf birch, К – cladonia, П – hare's-tail, О – sedges, Ис – blue willow, Им – woolly willow.

мерно в равной степени) и наличие в границах исследуемых водосборов единого источника поступления элемента в ткани растений. Сказанное подтверждается отсутствием статистически значимых различий концентрации меди между изученными растениями ($t_{\phi} = 0,0-1,90 < t_{95} = 2,45$).

Медь относится ко второму классу опасности (умеренно опасные вещества). Максимально допустимый уровень содержания составляет 30,0 мг/кг. Как видно из представленных данных (см. табл. 3, рис. 2) во всех образцах фактическая концентрация меньше МДУ.

Концентрация никеля в образцах исследуемых растений варьируется в диапазоне от 2,1 до 5,7 мг/кг (см. табл. 3), т. е. разница между мини-

мальным и максимальным значением составляет 270 %. Как и у меди, слабая степень варьирования показателя ($v = 31,0$) свидетельствует о наличии однородного источника его поступления в растение, но, в отличие от меди, в способности растений аккумулировать этот элемент проявляются некоторые межвидовые различия (см. рис. 2).

Среди сосудистых растений в максимальных (из выявленного диапазона значений) количествах никель аккумулируется в листьях кустарников (береза, ивы), меньше всего – в вегетирующей фитомассе трав (в 1,4–2,7 раза меньше). Идентичные с листьями ив показатели выявлены в талломе лишайников. Однако

различия не являются статистически значимыми ($t_{\phi} = 0,06-1,80 < t_{95} = 2,45$).

При усвоении никеля растениями происходит взаимодействие с содержащимися в почве водорастворимыми формами других элементов. При этом абсорбция никеля ингибируется медью и не ингибируется марганцем [9, 11]. То есть увеличение концентрации меди должно приводить к уменьшению концентрации никеля в растительных тканях. Проведенный парный корреляционный анализ выявил указанную тенденцию, но сила связи оказалась слабой ($R = -0,216$). Марганец является активатором процесса аккумуляции никеля. Парный корреляционный анализ подтвердил наличие положительной связи средней степени сопряжения ($R = 0,565$).

Если сравнивать средние значения концентраций в растениях между территориями водосборов (3,42 мг/кг – на водосборе р. Кыстыктах, 3,55 – р. Батайка, 4,65 мг/кг – р. Нерпалах), прослеживается тенденция последовательного увеличения концентрации в долготном направлении.

По классификации опасности никель относится ко II классу (умеренно опасные вещества). Максимально допустимый уровень его содержания составляет 3,0 мг/кг и, как видно (см. рис. 2), на исследуемой территории в пределах водосборов он превышен во всех образцах растений, за исключением двух – в вегетирующей фитомассе травянистых растений (пушица, осока). Минимальная величина превышения фактической концентрации над МДУ выявлена у ивы красивой (в 1,1 раза), максимальная – у березы карликовой (в 1,9 раза).

В настоящее время механизмы физиологического действия хрома (Cr) на растительные организмы недостаточно ясны, поэтому его не относят к микроэлементам. Валовое содержание элемента в почвах в естественных условиях достаточно высокое, однако концентрация растворимых его соединений очень мала, вследствие этого – незначительное накопление в растениях. Недостатка в этом элементе растения чаще всего не испытывают, поэтому не отмечены факты и не описаны внешние симптомы проявления его дефицита [9, 11].

Диапазон выявленных концентраций хрома в вегетативных органах растений составляет от 0,15 до 1,06 мг/кг (см. табл. 3). У этого элемента один из самых высоких показателей вариабель-

ности концентрации ($v = 73,9 \%$), что свидетельствует о специфичности его аккумуляции растениями разных таксонов. Наибольшей способностью аккумулировать хром обладают лишайники: концентрация элемента в их слоевище составляет 0,84–1,06 мг/кг. Среди сосудистых растений, независимо от местоположения водосбора, минимальные концентрации хрома выявлены в листьях кустарников: березы карликовой (0,135–0,15 мг/кг) и некоторых видов ив (0,143–0,147 мг/кг), максимальные – в травянистых растениях (0,53 мг/кг – у пушицы и 0,63 мг/кг – у осоки). Среди кустарников выделяется ива сизая, концентрация хрома в ее листьях (0,56 мг/кг) почти такая же, как и в травянистых растениях. Статистически значимые межвидовые различия концентраций хрома выявлены между кладонией и березой ($t_{\phi} = 3,4-4,37 > t_{95} = 2,45$), кладонией и ивами ($t_{\phi} = 4,02-4,33 > t_{95} = 2,45$). Различия концентрации хрома в слоевище кладонии с травянистыми растениями статистически незначимы ($t_{\phi} = 0,98-2,24 < t_{95} = 2,45$).

Хром относится к элементам II класса опасности (умеренно опасные вещества). МДУ его содержания составляет 0,5 мг/кг. Как видно (см. рис. 2), за исключением березы карликовой, ивы красивой и ивы мохнатой, фактическая концентрация элемента в вегетативных органах растений превышает МДУ. Величина превышения по видам растений варьирует: минимальная – у травянистых видов и ивы сизой – на 6–26 %, максимальная – у кладонии – на 68–112 %.

Анализируя вышеприведенные данные, отмечаем, что из шести элементов, для которых установлен временный МДУ содержания, фактическая концентрация только никеля и хрома в вегетативных органах некоторых растений, имеющих кормовое значение, превышает установленное значение. Причем преимущественно фиксируется превышение концентрации над МДУ либо никеля, либо хрома. Превышение над МДУ обоих элементов выявлено только в талломе лишайников и листьях ивы сизой. Указанное обстоятельство не может служить основанием для ограничения или запрета использования растительных сообществ с доминированием или участием этих видов в качестве кормовых угодий по причине того, что высокие концентрации некоторых микроэлементов могут быть обусловлены повышенной физиологической потребно-

стью в них растений, произрастающих в экстремальных условиях среды обитания. Подобная особенность на Западном Таймыре выявлена для никеля. В растениях тундры, лесотундры и тайги этот элемент накапливается в большем количестве в сравнении с растительностью других природных зон [10]. Физиологическая особенность растений, произрастающих на холодных и влажных почвах, в том, что в азотном питании преобладает аммонийная форма азота над его нитратной формой. А никель является компонентом ферментов уреазы и различных гидрогеназ. Это обстоятельство может служить природным фактором, способствующим высокому накоплению никеля в растениях тундры [10].

Кроме этого, особенностью региона является достаточно высокий диапазон концентраций химических элементов, соотношение между минимальными и максимальными значениями может составлять до 3000 % [10]. Выявленная для Западного Таймыра особенность характерна и для Авамской тундры, где различие концентраций марганца в вегетативных органах растений разных таксономических групп составляет более 3000 %. Таким образом, ресурс кормовых растений на изучаемой территории пригоден для развития такой отрасли сельского хозяйства, как домашнее оленеводство.

Заключение

При сравнительном анализе концентраций в растениях разных таксономических групп выявлены биологические особенности видов в усилении (или ослаблении) аккумуляции того или иного элемента. Лидером по аккумуляционной способности является лишайник – кладония. В его слоевище концентрация большинства исследованных тяжелых металлов (мышьяк, свинец, хром) больше, чем в вегетативных органах сосудистых растений, в 2 раза и более.

В накоплении марганца «лидерство» принадлежит типичному марганофилу – березе карликовой. Способность растения к повышенной аккумуляции элемента не утрачивается и в условиях сурового климата Арктики. К марганофилам мы также можем отнести иву мохнатую.

Медь в наибольших количествах накапливается в вегетирующей фитомассе травянистых видов.

Только по двум элементам (никель и хром) выявлено превышение фактических concentra-

ций над максимально допустимым уровнем содержания. Величина превышения незначительна и обусловлена, прежде всего, естественным геохимическим фоном, где в составе почвообразующей породы эти элементы представлены в больших количествах.

Вегетативные органы исследованных растений, таким образом, не могут считаться загрязненными, и они пригодны в пищу животным. Растительные сообщества с их участием можно использовать как пастбищные угодья.

Литература

1. Кобиляков И. Путранский марафон: миграция диких северных оленей // NATIONAL GEOGRAPHIC Россия [Электронный ресурс]. URL: <https://nat-geo.ru/nature/putranskiy-marafon-migratsiya-dikikh-severnykh-oleney/> (дата обращения 09.02.2022 г.).
2. Изменения климата вынуждают оленей Таймыра менять сроки миграции. 07 августа 2020 // WWF : официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://wwf.ru/resources/news/bioraznoobrazie/izmeneniya-klimata-vynuzhdayut-oleney-taymyra-menyat-sroki-migratsii/> (дата обращения 09.02.2022 г.).
3. Секретарева Н.А. Сосудистые растения Российской Арктики и сопредельных территорий. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2004. 131 с.
4. Белоусова Е.Н. Инструментальные методы исследования почв и растений: учеб. пособие. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2014. 267 с.
5. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. М., 1998 (издание 2005 г.). 31 с.
6. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Альянс, 2011. 350 с.
7. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках / Утв. Зам. начальника Главного управления ветеринарии Госагропрома СССР А.Д. Третьяковым 7 августа 1987 года [Электронный ресурс]. URL: www.consultant.ru. (дата обращения 10.02.2022 г.).
8. Сысо А.И. Российские нормативы оценки качества почв и кормов: проблемы их использования // Экологический мониторинг окружающей среды / Материалы международной школы молодых ученых. Новосибирск: Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2016. С. 153–168.
9. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1112–1119.

10. Сысо А.И., Колпащиков Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиromля Т.И. Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра // Сибирский экологический журнал. 2014. № 6. С. 855–862.

11. Анспок П.И. Микроудобрения: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Агропромиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. 272 с.

Поступила в редакцию 30.03.2022

Поступила после рецензирования 20.04.2022

Принята к публикации 28.04.2022

Об авторах

ТУРЧИНА Татьяна Анатольевна, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (НИИСХ и ЭА ФКНЦ СО РАН), 663302, Норильск, ул. Комсомольская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0001-9287-7544>, Author ID: 57039211000, Researcher ID: AAT-8537-2020, e-mail: tatturchina@mail.ru

ЯНЧЕНКО Зоя Анатольевна, кандидат биологических наук, директор, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства и экологии Арктики – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (НИИСХ и ЭА ФКНЦ СО РАН), 663302, Норильск, ул. Комсомольская, 1, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-2534-4814>, e-mail: norilskniiks@mail.ru

Для цитирования

Турчина Т.А., Янченко З.А. Оценка безопасности оленьих пастбищ Авамской тундры по содержанию тяжелых металлов в вегетативных органах растений // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 246–257. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257

Assessment of the reindeer pastures safety in the Avam tundra: content of heavy metals in the vegetative organs of plants

T.A. Turchina*, Z.A. Yanchenko

«Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic» –
Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», Norilsk, Russia
*tatturchina@mail.ru

Abstract. The changes in migration routes of the wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) have made it relevant to use pasture lands in the Avam tundra (south of the Taymyr Peninsula) for the development of domestic reindeer husbandry. The safety of forage plants is an essential condition for the reindeer husbandry. We aimed to study vegetative aboveground phytomass of the most common forage plants (lichens, cotton grass, sedge, shrubs). The ultimate composition and concentration of heavy metals were determined by pyrolysis using an atomic absorption analyzer RA-915+. We have assessed pasture safety by comparing the obtained data with the established maximum permissible level (MPL) of the chemical elements contained in feeds for the farm animals. The detected high variability of the element concentrations ($v = 21.8–96.6\%$) can be attributed to the biological specifics of the species under study. We have found the maximum content of the elements of hazard class I (As, Hg, Pb) in lichen thallus (*Cladonia* genus). Regardless of the taxonomic status of the species, three chemical elements (Mn, Cu and Ni) account for 96.88–99.97 % of the gross content of their water-soluble forms. The concentration of nickel (except for baseous species) and chromium

(except for shrubs) exceeded the maximum permissible level established for the farm animal feeds by 1.1–1.9 and 1.1–2.1 times, respectively. Taking into account the features of the regional geochemical background, the actual content of heavy metals in forage plants is not dangerous. Therefore, we conclude that the territory of the Avam tundra is suitable for developing domestic reindeer husbandry.

Keywords: reindeer pastures, plants, heavy metals, concentration, maximum allowable content, feed safety

References

1. Kobilyakov I. Putoranskiy marafon: migratsiya dikih severnykh oleney // NATIONAL GEOGRAPHIC Rossiya [Elektronnyy resurs]. URL: <https://nat-geo.ru/nature/putoranskiy-marafon-migratsiya-dikikh-severnykh-oleney/> (data obrashcheniya 09.02.2022 g.).
2. *Izmeneniya klimata vyzhdayut oleney Tajmyra menyat' sroki migratsii*. 07 avgusta 2020 // WWF : oficial'nyy sayt [Elektronnyy resurs]. URL: <https://wwf.ru/resources/news/bioraznoobrazie/izmeneniya-klimata-vyzhdayut-oleney-tajmyra-menyat-sroki-migratsii/> (data obrashcheniya 09.02.2022 g.).
3. Sekretareva N.A. Sosudistye rasteniya Rossijskoj Arktiki i sopredel'nyh territorij. M.: Tovarishestvo nauchnykh izdanij KMK, 2004. 131 p.
4. Belousova E.N. Instrumental'nye metody issledovaniya pochv i rastenij: ucheb. Posobie. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk. gos. agrar. un-t, 2014. 267 p.
5. Metodika vypolneniya izmerenij soderzhaniya metallov v tverdyh ob'ektah metodom spektrometrii s induktivno-svyazannoj plazmoj. PND F 16.1:2.3:3.11-98. M., 1998 (izdanie 2005 g.). 31 p.
6. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij). M.: Al'yanC, 2011. 350 p.
7. Vremennyj maksimal'no-dopustimyj uroven' (MDU) soderzhaniya nekotorykh himicheskikh elementov i gossipola v kormah dlya sel'skoxozyajstvennykh zhivotnykh i kormovykh dobavkah / Utv. Zam. nachal'nika Glavnogo upravleniya veterinarii Gosagroproma SSSR A.D. Tret'yakovym 7 avgusta 1987 goda [Elektronnyy resurs]. URL: www.consultant.ru. (data obrashcheniya 10.02.2022 g.).
8. Syso A.I. Rossijskie normativy ocenki kachestva pochv i kormov: problemy ih ispol'zovaniya // Ekologicheskij monitoring okruzhayushchej sredy / Materialy mezhdunarodnoj shkoly molodykh uchenykh. Novosibirsk: Izdatel'skij centr NGAU «Zolotoj kolos», 2016. P. 153–168.
9. Il'in V.B. Tyazhelye metally v sisteme pochva–rastenie // Pochvovedenie. 2007. No. 9. P. 1112–1119.
10. Syso A.I., Kolpashchikov L.A., Ermolov Yu.V., Cherevko A.S., Siromlya T.I. Elementnyy himicheskij sostav pochv i rastenij Zapadnogo Tajmyra // Sibirskij ekologicheskij zhurnal. 2014. No. 6. P. 855–862.
11. Anspok P.I. Mikroudobreniya: Spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. L.: Agropromizdat. Leningr. otdnie, 1990. 272 p.

Submitted 30.03.2022

Revised 20.04.2022

Accepted 28.04.2022

About the authors

TURCHINA, Tatiana Anatolyevna, Dr. Sci. (Agriculture), chief researcher, «Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic», Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», 1 Komsomolskaya st., Norilsk 663302, Russia, <https://orcid.org/0000-0001-9287-7544>, Author ID: 57039211000, Researcher ID: AAT-8537-2020, e-mail: tatturchina@mail.ru

YANCHENKO, Zoya Anatolyevna, Cand. Sci. (Biology), director, «Research Institute of Agriculture and Ecology of the Arctic», Branch of the Federal Research Center «Krasnoyarsk Science Center», 1 Komsomolskaya st., Norilsk 663302, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3534-4814>, e-mail: norilskniiks@mail.ru

For citation

Turchina T.A. Yanchenko Z.A. Assessment of the reindeer pastures safety in the Avam tundra: content of heavy metals in the vegetative organs of plants // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 246–257. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-246-257>