

НАКОПЛЕНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ СОЛЕЙ В АЛЛЮВИАЛЬНОЙ ПОЧВЕ И РАСТЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОЙ ТАЙГИ

И. В. Пахоруков¹, О. А. Четина², О. З. Еремченко³

^{1, 2, 3} Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

¹ Ivan-psu@yandex.ru, ² chetoks@gmail.com, ³ eremch@psu.ru

Аннотация. Актуальность и цели. При производстве калийных удобрений образуется большое количество отходов; при складировании содержащиеся в них соли растворяются осадками и принимают участие в формировании грунтового стока. В долинах малых рек высокоминерализованные грунтовые воды способствуют засолению почв и формированию особого растительного сообщества. Цель работы – установить особенности засоления аллювиальной почвы и интенсивность накопления катионов Cl^- , Na^+ , K^+ и Ca^{2+} растениями в условиях южной тайги. **Материалы и методы.** В почвенных пробах общепринятыми методами определяли гидролитическую кислотность, состав обменных оснований, ионно-солевой состав водной вытяжки, подвижные Na^+ и K^+ . В листьях растений установили содержание Cl^- , Na^+ , K^+ и Ca^{2+} . Обработку результатов провели с применением дисперсионного и регрессионного анализа. Площадь техногенного засоления установили при помощи программы QGIS 3.16. **Результаты.** В долине малой реки Быгель под воздействием техногенных минерализованных вод сформировались аллювиальные серогумусовые сильнозасоленные почвы. Установлены регрессионные зависимости между степенью техногенного засоления почвы и содержанием ионов в листьях *Chenopodium glaucum* L., *Atriplex patula* L. и *Juncus bufonius* L. **Выводы.** В аллювиальной почве в составе водорастворимых солей преобладали хлориды натрия и калия, а в составе обменных катионов – ионы K^+ . С усилением техногенного засоления в листьях *Chenopodium glaucum*, *Atriplex patula* и *Juncus bufonius* увеличивалось содержание засоряющих ионов, а также избирательно накапливался кальций. Уровень содержания K^+ в этих растениях соответствовал накоплению ионов Na^+ . *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl. характеризовалась наименьшим содержанием K^+ , Na^+ и Cl^- в листьях.

Ключевые слова: аллювиальная почва, техногенное засоление, факультативные галофиты, накопление ионов

Для цитирования: Пахоруков И. В., Четина О. А., Еремченко О. З. Накопление техногенных солей в аллювиальной почве и растениях в условиях южной тайги // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2022. Vol. 7 (2). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-2-3>

ACCUMULATION OF TECHNOGENIC SALTS IN ALLUVIAL SOIL AND PLANTS IN THE CONDITIONS OF THE SOUTH TAIGA SUBZONE

I. V. Pakhorukov¹, O. A. Chetina², O. Z. Eremchenko³

^{1, 2, 3} Perm State National Research University, 15 Bukireva street, Perm, 614990, Russia

¹ Ivan-psu@yandex.ru, ² chetoks@gmail.com, ³ eremch@psu.ru

Abstract. *Background.* In the production of potash fertilizers, a large amount of waste is generated; during storage, the salts contained in them are dissolved by precipitation and take part in the formation of ground runoff. In the valleys of small rivers, highly mineralized groundwater contributes to soil salinization and the formation of a special plant community. The aim of the article is to establish the salinization features of alluvial soil and the intensity of accumulation of Cl^- , Na^+ , K^+ and Ca^{2+} cations by plants in the conditions of the southern taiga. *Materials and methods.* In soil samples, the following methods were used to determine: hydrolytic acidity, composition of exchange bases, ionic-salt composition of aqueous extract, mobile Na^+ and K^+ . The content of Cl^- , Na^+ , K^+ and Ca^{2+} was found in the leaves of plants. The results were processed using variance and regression analysis. The area of technogenic salinization was established using the QGIS 3.16 program. *Results.* In the valley of the small Bygel River, under the influence of technogenic mineralized waters, alluvial gray-humus highly saline soils were formed. Regression dependences have been established between the degree of technogenic soil salinization and the ion content in the leaves of *Chenopodium glaucum* L., *Atriplex patula* L. and *Juncus bufonius* L. *Conclusions.* In alluvial soil, sodium and potassium chlorides predominated in the composition of water-soluble salts, and K^+ ions predominated in the composition of exchange cations. With the intensification of technogenic salinization in the

leaves of *Chenopodium glaucum*, *Atriplex patula* and *Juncus bufonius*, the content of saline ions increased, and calcium selectively accumulated. The level of K^+ content in these plants corresponded to the accumulation of Na^+ ions. *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl. was characterized by the lowest content of K^+ , Na^+ and Cl^- in the leaves.

Keywords: technogenic salinization, alluvial soil, facultative halophytes, selectivity of absorption

For citation: Pakhorukov I.V., Chetina O.A., Eremchenko O.Z. Accumulation of technogenic salts in alluvial soil and plants in the conditions of the south taiga subzone. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2022;7(2). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-2-3>

Введение

В долинах малых рек Прикамья из-за разгрузки техногенных минерализованных вод развивается вторичное засоление аллювиальных почв [1]. Засоленные аллювиальные почвы стали качественно новой средой обитания растений, к ним адаптируются факультативные галофиты из местных рудеральных видов [2]. У факультативных галофитов, характеризующихся высокой экологической пластичностью, основную стратегию выживания связывают с ограничением поступления засоляющих ионов через корневую систему [3].

Под воздействием подземных минерализованных вод, сконцентрированных на территории солеотвала Березниковского калийного производственного рудоуправления № 4, в долине малой реки Быгель сформировался засоленный участок. Расстояние от солеотвала БКПРУ-4 до исследованного участка составляет около 800 м, средний уклон поверхности – около 4 %. Пятно с изреженным травяным покровом впервые обнаружено на космоснимках 2013 г.; в 2020 г. его площадь составила 2027 м².

Цель исследований – установить особенности засоления аллювиальной почвы и интенсивность накопления засоляющих ионов растениями.

Материалы и методы

Для изучения аллювиальной почвы в центральной и краевой части участка с изреженной травяной растительностью были заложены два разреза до глубины водонасыщенных слоев. Диагностика почв проведена в соответствии с современной классификацией почв России [4]. Из основных почвенных горизонтов отобраны пробы для изучения свойств почвы.

В пределах исследуемой территории поймы растительный покров отличался низким проективным покрытием (30–40 %), повсеместно встречались марь сизая (*Chenopodium glaucum* L.), лебеда раскидистая (*Atriplex patula* L.), ситник жабий (*Juncus bufonius* L.), бескильница расставленная (*Puccinellia distans* (Jacq.) Parl.); реже росли вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* L.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) и мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.).

В пяти местах произрастания лебеда, мари, ситника и бескильницы провели сопряженный

отбор почвы из прикорневой зоны, а также сбор листьев растений. Почвенные пробы сушили в помещении до воздушно-сухого состояния. Листья растений фиксировали при температуре 105 °С и досушивали при 60 °С.

В отобранных из разрезов образцах почвы определяли гидролитическую кислотность – по методу Каппена, состав обменных оснований – по Пфефферу в модификации Молодцова и Игнатовой. Ионно-солевой состав изучали в водной вытяжке (в соотношении «почва : раствор» – 1:5): HCO_3^- – титрованием раствором серной кислоты, SO_4^{2-} – весовым методом, Cl^- – аргентометрическим методом по Мору, Ca^{2+} и Mg^{2+} – комплексонометрическим методом, Na^+ и K^+ – пламенно-фотометрическим методом.

В пробах из прикорневой части растений определили содержание ионов Cl^- в водной вытяжке – по Мору; подвижных Na^+ и K^+ , извлеченных 0,2 н. раствором HCl при соотношении «почва : раствор» – 1:5, с последующим определением на пламенном фотометре. В состав подвижных Na^+ и K^+ , кроме водорастворимых ионов, входят обменные катионы, доступные для поглощения корневой системой растений.

Для определения в листьях растений катионов Ca^{2+} , K^+ , Na^+ высушенный материал озолили при температуре 500 °С и приготовили солянокислую вытяжку; концентрацию катионов K^+ и Na^+ установили методом пламенной фотометрии на ФПА-2, содержание Ca^{2+} – комплексонометрическим методом. Хлорид-ионы из листьев извлекали водной вытяжкой с последующим определением их содержания по Мору.

Сравнение растений по содержанию ионов провели дисперсионным методом с применением критерия Краскела – Уоллиса; значимыми считали различия между сравниваемыми средними величинами с доверительной вероятностью 95 % и выше ($p < 0,05$). В исследовании приведены средние арифметические биологических повторностей и их стандартные ошибки. Зависимость между содержанием ионов в почве и в листьях растений установили методом регрессионного анализа.

Площадь пятна с растительностью на техногенно засоленных аллювиальных почвах в долине р. Быгель рассчитали при помощи программы QGIS 3.16.

Результаты

Разрез 1 расположен в центре исследуемого участка поймы. Проективное покрытие растительности – 30–40 %, произрастают бескильница расставленная, лебеда раскидистая, марь си-

зая, ситник жабий. Лишенная растений поверхность почвы покрыта выцветами солей. Ниже следует морфологическое описание профиля серогумусовой аллювиальной глеевой техногенно засоленной почвы (рис. 1).

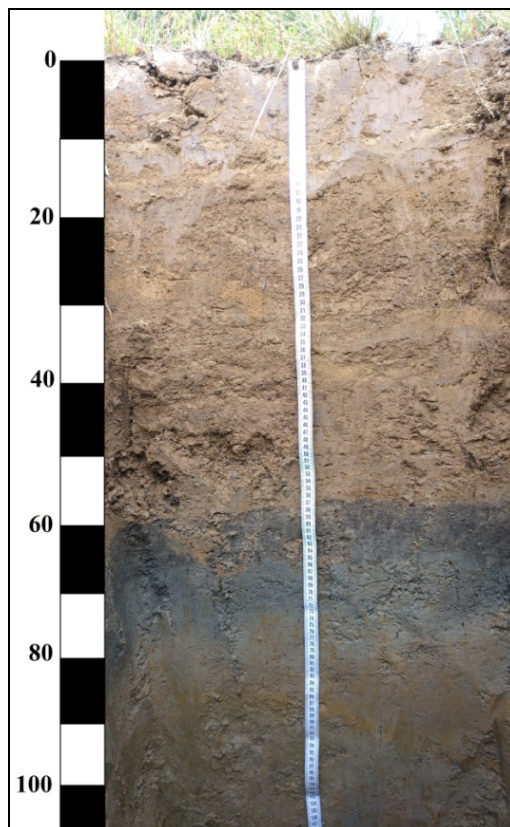


Рис. 1. Аллювиальная серогумусовая глеевая почва (разрез 1)

Fig. 1. Alluvial grey-humus gley soil (section 1)

АУ – серогумусовый горизонт, 0–10/10 см, верхний слой 0–4 см переплетен корнями травянистых растений, рыжевато-бурый, суглинистый, влажный, структура порошистая, переход очень постепенный.

АУ/Сg~ – переходный глееватый горизонт, 10–57/47 см, рыжевато-бурый, в нижней части горизонта появляются ржавые примазки, слоистый: слои песка перемежаются суглинистыми слоями; корни трав проникают до глубины около 43–45 см; переход к нижележащему горизонту заметный по цвету и структуре.

[АУg] – погребенный гумусовый глееватый горизонт, мощность 57–80/23 см, темно-серой окраски, местами почти черный со стальным блеском, в нижней части появляются сизые тона, пронизан остатками корней трав, сохранивших анатомическое строение, структура крупнозернистая и мелкоореховатая, присутствуют корневины, покрытые железистыми новообразованиями, суглинистый, влажный, переход к нижележащему горизонту постепенный.

СG~ – почвообразующая глеевая порода, мощность 80–127/47 см, рыже-сизой окраски с множеством ржавых пятен, в нижней части ржавые пятна большего размера, бесструктурный, легкосуглинистый, с глубины около 124 см сочится вода.

Разрез 2 расположен в краевой части исследуемого участка поймы, на расстоянии около 1 м от русла высохшего ручья, поверхность которого покрыта выцветами солей. Проективное покрытие растительности не более 30–40 %, произрастают бескильница расставленная, лебеда раскидистая, мать-и-мачеха. Ниже следует морфологическое описание профиля серогумусовой аллювиальной глеевой техногенно засоленной почвы (рис. 2).

АУ – серогумусовый горизонт, 0–10/10 см, темно-бурой окраски с темными, почти черными пятнами в местах скопления органических остатков, бесструктурный, суглинистый, влажный, переплетен корнями, переход к нижележащему горизонту постепенный.

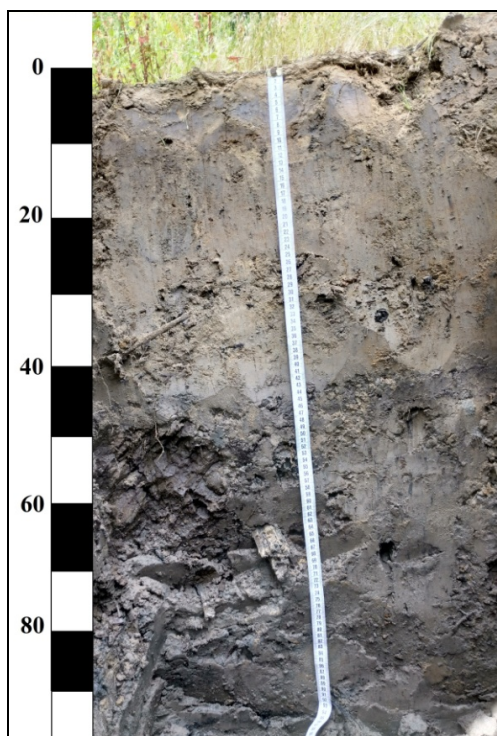


Рис. 2. Аллювиальная серогумусовая глеевая почва (разрез 2)

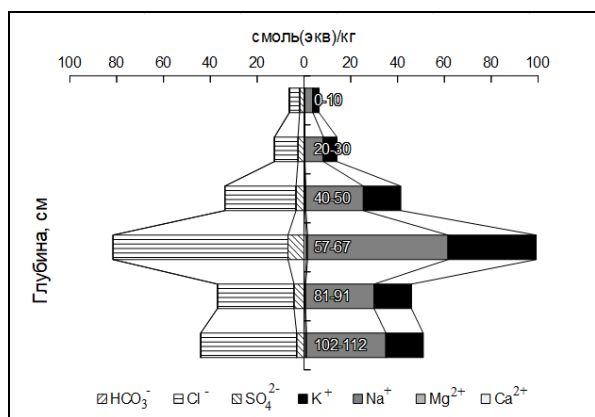
Fig. 2. Alluvial grey-humus gley soil (section 2)

AY/Cg $\sim$ – переходный глееватый горизонт, 10–41/31 см, неоднородной окраски: рыже-серо-бурый с черными пятнами и ржавыми примазками; слоистый: суглинистые слои чередуются со слоями песка; бесструктурный, влажный, переход к нижележащему горизонту заметный.

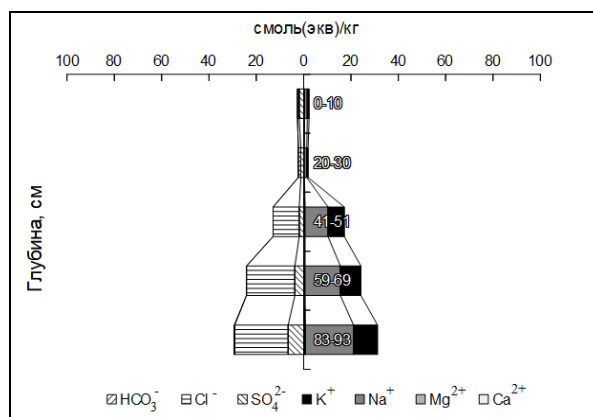
[AYg] – погребенный гумусовый глееватый горизонт, мощность 41–56/15 см, темно-серой окраски, суглинистый, включает материал плотных глинистых кусочков, обломки веток, древесины, множество мелких корней, переход к нижележащему горизонту постепенный.

CG $\sim$ – глеевая почвообразующая порода, 56–95/40 см, окраска сизая, песчаная, бесструктурная, сырая, встречаются обломки корней деревьев, с глубины 93 см сочится вода.

В соответствии с предложенными градациями засоленности [4] аллювиальная серогумусовая почва в разрезе 1 является солончаковой, сильнозасоленной – в серогумусовом горизонте, с хлоридным калиево-натриевым химизмом (рис. 3,а). Аллювиальная почва в разрезе 2 – солончаковатая, сильнозасоленная – в средней части профиля, с хлоридным калиево-натриевым химизмом (рис. 3,б).



а)



б)

Рис. 3. Содержание ионов в водных вытяжках из аллювиальных серогумусовых глеевых почв в долине р. Быгель: а – разрез 1; б – разрез 2

Fig. 3. The content of ions in water extracts from alluvial grey-humus gley soils in the valley of the river Bygel: a – section 1; b – section 2

В составе обменных катионов аллювиальных почв преобладают ионы K^+ , которые составляют 54–70 % от емкости катионного обмена (ЕКО) (табл. 1). На долю натрия

приходится около 16–26 % ЕКО, содержание обменного кальция и магния небольшое. В разрезе 1 присутствует обменная кислотность – около 6–9 % от ЕКО.

Таблица 1

Table 1

Содержание обменных катионов в аллювиальных засоленных почвах

The content of exchangeable cations in alluvial saline soils

№ разреза	Глубина, см	ЕКО, моль(экв)/100 г	Доля от ЕКО, %				
			Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	$H^+ + Al^{3+}$
1	0–10	22,46	3,56	5,70	20,66	60,86	9,22
	20–30	17,81	3,59	4,49	19,54	66,03	6,34
	40–50	24,81	3,22	3,87	16,00	70,09	6,81
2	0–10	22,52	7,10	5,68	26,51	60,70	0
	20–30	11,99	9,34	10,68	25,85	54,13	0
	41–51	23,31	7,55	4,80	26,30	61,35	0

Известно, что в условиях засоления одним из «дешевых» осморегуляторов является $NaCl$, однако ионы Na^+ и Cl^- в избыточном количестве токсичны для растений. По среднему содержанию Cl^- в листьях растения выстроились в следующей последовательности: лебеда >

марь $\geq$ ситник $\geq$ бескильница (рис. 4). Максимальным накоплением хлорид-ионов – в среднем до 1000 мг/10 г сухой массы – в листьях отличилась лебеда. У остальных растений в среднем содержании Cl^- не установлено значимых различий.

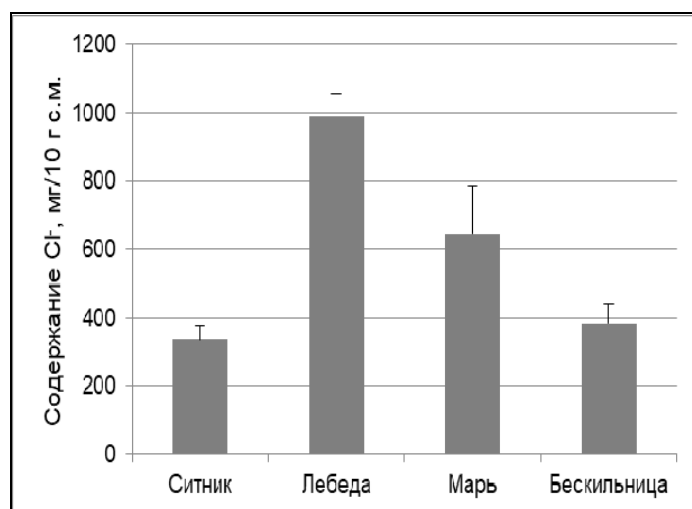


Рис. 4. Содержание ионов Cl^- в листьях растений на аллювиальных техногенно засоленных почвах, мг/10 г сухой массы

Fig. 4. The content of Cl^- ions in the leaves of plants on alluvial technogenically saline soils, mg/10 g of dry weight

У мари накопление Cl^- в листьях прямо пропорционально увеличению его содержания в почве (рис. 5). Согласно полученному уравнению регрессии, при увеличении содержания Cl^- в почве от 1 до 8 смоль(экв)/кг количество хлорид-иона в листьях мари возрастало от 245 до 1143 мг/10 г сухой массы. У остальных растений значимых связей между содержанием

хлорид-ионов в почве и в листьях не установлено.

По среднему содержанию Na^+ в листьях растения расположены в следующей последовательности: лебеда > марь > ситник > бескильница (рис. 6); видовые различия в уровне аккумуляции Na^+ оказались математически значимыми.

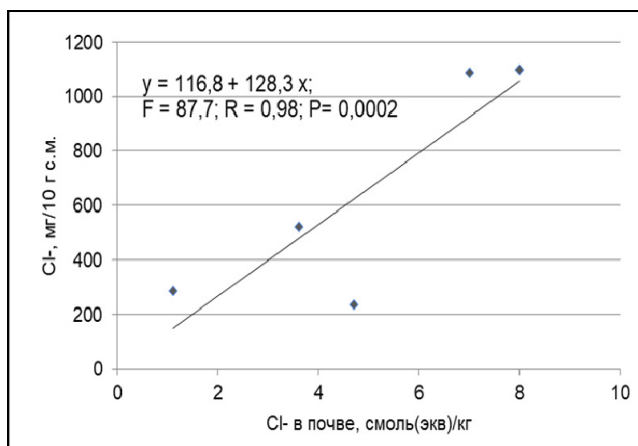


Рис. 5. Зависимость между содержанием Cl^- в листьях мари, мг/10 г сухой массы, от содержания Cl^- в прикорневой зоне, смоль(экв)/кг почвы

Fig. 5. Relationship between Cl^- content in mari leaves, mg/10 g of dry weight, on the content of Cl^- in the root zone, cmol(eq)/kg of soil

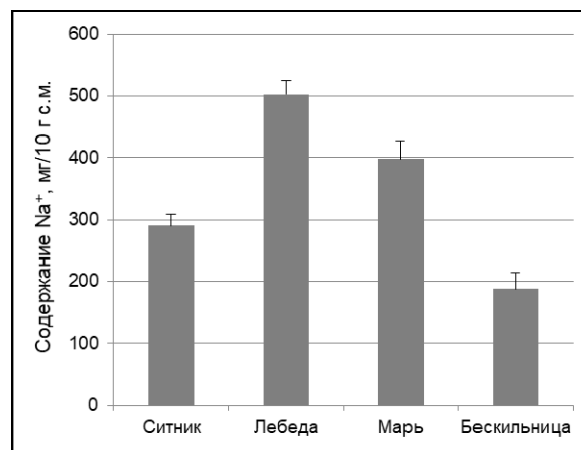


Рис. 6. Содержание ионов Na^+ в листьях растений на аллювиальных вторично засоленных почвах, мг/10 г сухой массы

Fig. 6. The content of Na^+ ions in the leaves of plants on alluvial secondary saline soils, mg/10 g of dry weight

У трех видов растений (лебеда, марь, ситник) с усилением засоленности почвы увеличивалась аккумуляция Na^+ в листьях. В листьях лебеды установлена прямолинейная зависимость между накоплением Na^+ и содержанием подвижного Na^+

в почве (рис. 7). Согласно полученному уравнению регрессии, при увеличении количества подвижного натрия от 62 до 97 смоль(экв)/кг содержание Na^+ в листьях лебеды возрастало от 429 до 565 мг/10 г сухой массы.

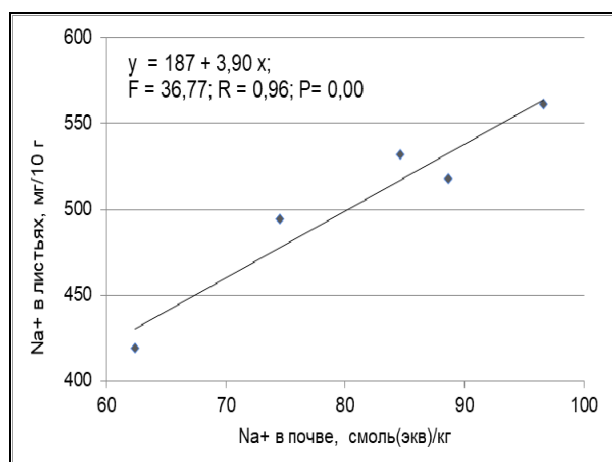


Рис. 7. Зависимость накопления Na^+ в листьях лебеды, мг/10 г сухой массы, от содержания подвижного натрия в почве, смоль(экв)/кг почвы

Fig. 7. Dependence of Na^+ accumulation in quinoa leaves, mg/10 g of dry weight, on the content of mobile sodium in the soil, cmol (eq)/kg of soil

В листьях мари регрессионная зависимость между количеством Na^+ в листьях (y , мг/10 г) и содержанием подвижного Na^+ в почве (x , смоль(экв)/кг) представлена уравнением: $y = 206,0 + 2,22 x$; критерий Фишера $F = 7,751$; коэффициент корреляции $R = 0,89$; уровень значимости нулевой гипотезы $P = 0,013$. У ситника прямолинейная связь между накоплением Na^+ в листьях и содержанием подвижного натрия в почве имеет вид следующего уравне-

ния: $y = 145,3 + 3,13 x$; $F = 5,88$; $R = 0,86$; $P = 0,024$.

По среднему содержанию ионов K^+ в листьях растения выстроились в следующей последовательности: лебеда $\geq$ марь $\geq$ ситник $>$ бескильница (рис. 8). Бескильница отличилась наименьшим накоплением K^+ в листьях; у остальных растений не установлено значимых различий в содержании этого катиона.

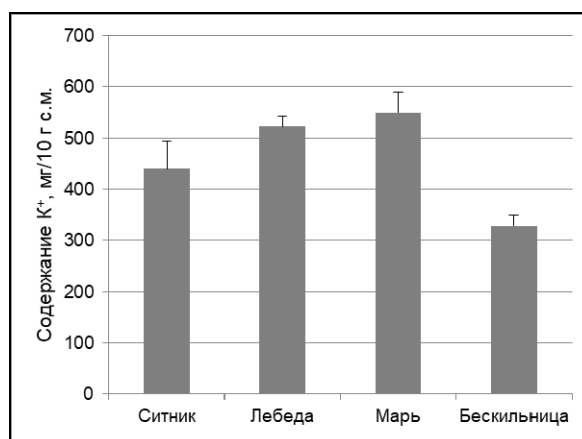


Рис. 8. Содержание ионов K^+ в листьях растений на аллювиальных вторично засоленных почвах, мг/10 г сухой массы

Fig. 8. The content of K^+ ions in plant leaves on alluvial secondary saline soils, mg/10 g of dry weight

Содержание K^+ в листьях ситника и бескильницы превышало содержание Na^+ ; у мари, напротив, ионов натрия было больше, чем ионов калия (см. рис. 6). Лебеда содержала в листьях в среднем равное количество этих катионов.

На фоне заметной изменчивости содержания Ca^{2+} в листьях не установлено значимых разли-

чий в накоплении этого иона растениями (рис. 9). Одновременно аккумуляция кальция в растениях зависела от засоленности почвы или была связана с накоплением засоряющих ионов в листьях, что демонстрируют полученные прямолинейные сильные регрессионные зависимости.

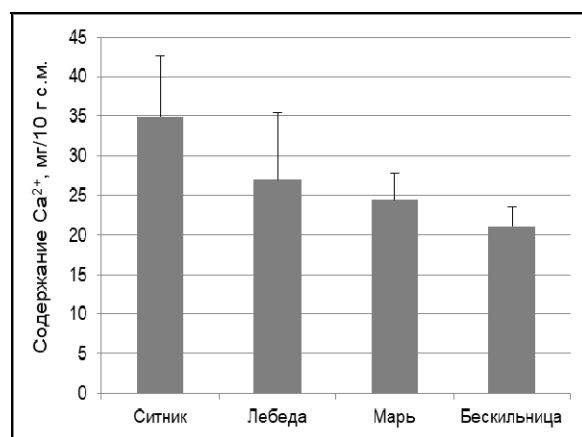


Рис. 9. Содержание ионов Ca^{2+} в листьях растений на аллювиальных вторично засоленных почвах, мг/10 г сухой массы

Fig. 9. The content of Ca^{2+} ions in the leaves of plants on alluvial secondary saline soils, mg/10 g of dry weight

У мари аккумуляция Ca^{2+} в листьях возрастала с усилением натриевого засоления почвы: $y = 128,9 + 1,27 x$; $F = 35,36$; $R = 0,96$; $P = 0,0001$ (рис. 10). Согласно полученному уравнению регрессии, увеличение количества подвижного Na^+ в почве от 35 до 163 смоль(экв)/кг почвы сопровождалось увеличением содержания Ca^{2+} в листьях от 173 до 335 мг/10 г сухой массы.

В листьях лебеды содержание Ca^{2+} увеличивалось с усилением хлоридного засоления поч-

вы (x , смоль(экв)/кг почвы): $y = 5,03 x - 19,97$; $F = 17,59$; $R = 0,92$; $P = 0,0003$.

В листьях мари накопление Ca^{2+} (y , мг/10 г сухой массы) прямо пропорционально связано с содержанием Cl^- (x , мг/10 г сухой массы): $y = 13,07 + 0,017 x$; $F = 25,02$; $R = 0,95$; $P = 0,0001$; а также с количеством Na^+ в листьях: $y = 8,05 + 0,041 x$; $F = 6,34$; $R = 0,82$; $P = 0,007$. У ситника проявилась взаимосвязь между количеством ионов Ca^{2+} и Cl^- в листьях: $y = 0,184 x - 27,1$; $F = 15,3$; $R = 0,91$; $P = 0,0005$.

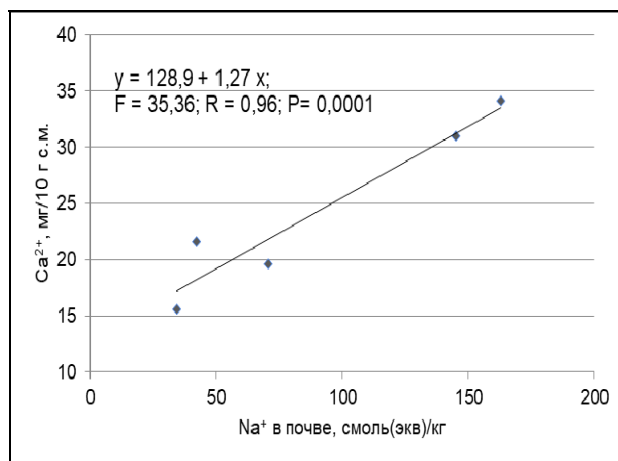


Рис. 10. Зависимость накопления Ca^{2+} в листьях мари (мг/10 г сухой массы) от содержания подвижного натрия в почве (смоль(экв)/кг почвы)

Fig. 10. Dependence of Ca^{2+} accumulation in mari leaves (mg/10 g of dry weight) on the content of mobile sodium in the soil (cmol (eq)/kg of soil)

Обсуждение

Аллювиальная почва в долине р. Быгель характеризуется преобладанием хлоридов натрия в составе техногенных солей; однако, в отличие от природных засоленных почв, содержится много хлорида калия. Катионы K^+ преобладают в составе обменных оснований. Преобладание обменного калия в аллювиальной почве, по-видимому, связано с избирательной концентрацией растениями этого питательного элемента, что препятствует его вымыванию осадками.

При увеличении засоленности корневой среды растения испытывают осмотическое и токсическое воздействие солей [5–8]. Движение ионов Na^+ через мембрану растительной клетки регулируется специальными каналами; но в условиях засоления пассивный транспорт Na^+ может идти и при участии калиевых транспортеров [9]. Исследуемые растения, особенно представители семейства *Chenopodiaceae*, аккумулировали в листьях значительные количества ионов Na^+ . У мари, лебеды и ситника накопление ионов Na^+ в листьях прямо пропорционально связано с количеством подвижного Na^+ в почве прикорневой зоны. Накопление засоряющих ионов в листьях растений необходимо для снижения водного потенциала клеточных растворов. При этом токсическое воздействие солей на цитоплазматические процессы устраняется путем вакуолярной компартментации [3, 8, 10].

В листьях мари аккумуляция хлорид-ионов прямо пропорционально усиливалась с увеличением содержания Cl^- в почве прикорневой зоны. В условиях засоления при быстрой диффузии Na^+ в клетки корня происходит деполяризация мембраны, что способствует входу хлорид-ионов по электрохимическому градиен-

ту через анионные каналы. После достижения нового равновесного состояния и реполяризации плазмолеммы Cl^- может транспортироваться против электрохимического потенциала с помощью $2\text{H}^+/\text{Cl}^-$ – симпортера. Необходимый трансмембранный градиент электрохимического потенциала протонов генерируется H^+ – АТФазой плазмолеммы клеток корня [5]. Высокий уровень накопления в листьях мари и лебеды хлорид-ионов (достигает 1100 мг/10 г сухой массы), возможно, связан с работой специальных желез; некоторые представители рода *Atriplex* и *Chenopodium* имеют на листьях пузырьчатые волоски, аккумулирующие NaCl [3].

У бескильницы не выявлено зависимости между накоплением Na^+ и Cl^- в листьях и показателями засоленности почвы. По-видимому, она, как и многие факультативные галофиты, способна контролировать процессы поглощения ионов корнями и транспорта в листья [3].

Известно, что на засоленных почвах у растений проявляется дефицит калия [11]. Рядом исследований подтверждена важная роль K^+ в растениях при засолении [12, 13]; даже у галофитов дефицит калия является стрессовым фактором [11, 14]. Характерной особенностью засоленной аллювиальной почвы является высокое содержание доступного растениям калия. Накопление K^+ в листьях растений при техногенном засолении не уступало содержанию Na^+ . Способность растительных клеток поддерживать стабильный уровень цитоплазматического K^+ в среде с повышенной концентрацией Na^+ служит ключевым фактором в определении способности переносить солевой стресс [15]. Ранее нами установлено, что в листьях пшеницы и ржи, выращенных на засоленных почвах с разной реакцией почвенной среды, увеличивалось содержание ионов K^+ [16].

В условиях засоленной корневой среды активация растением мембранного транспорта Ca^{2+} играет немаловажную роль [17]. Некоторые натриевые каналы клеточной мембраны могут блокироваться ионами Ca^{2+} , и поток Na^+ внутрь растений перекрывается [5]. У мари, лебеды и ситника избирательное накопление кальция при прогрессирующем техногенном засолении, по-видимому, имеет адаптивный характер. На многих растительных объектах показано повышение устойчивости тканей интактных растений к неблагоприятным факторам под действием экзогенного кальция [18]. Усиленную аккумуляцию кальция рассматривают в качестве защитной реакции растений на засоление корневой среды. В листьях и корнях пшеницы наблюдали повышение количества Ca^{2+} в условиях солевого стресса [19]. При выращивании ржи и пшеницы на дерново-подзолистой почве, засоленной NaCl, в листьях растений отмечали избирательное поглощение Ca^{2+} [16].

Заключение

1. Серогумусовая аллювиальная почва, находящаяся под воздействием техногенных

минерализованных грунтовых вод, характеризуется сильным засолением (в горизонте максимального содержания солей), хлоридным калиево-натриевым химизмом и преобладанием K^+ в составе обменных катионов.

2. Лебеда и марь накапливали наибольшее количество Na^+ и Cl^- ; количество этих ионов в листьях увеличивалось с усилением хлоридно-натриевого засоления почвы.

3. Ситник жабий характеризовался сравнительно небольшим содержанием в листьях Na^+ , Cl^- , при этом количество Na^+ в листьях возрастало с усилением натриевого засоления почвы.

4. Бескильница характеризовалась наименьшим содержанием Na^+ и Cl^- ; зависимости между содержанием исследуемых ионов в листьях растений и в почве не установлено.

5. В условиях засоления содержание K^+ в растениях было сопоставимо с количеством в них ионов Na^+ , что обусловлено, по-видимому, составом техногенных солей в почве.

6. В листьях мари, лебеды и ситника накопление Ca^{2+} возрастало на фоне увеличения количества засоряющих ионов в почве и/или в листьях растений.

Список литературы

1. Eremchenko O. Z., Pakhorukov I. V., Shestakov I. E. Development of the Solonchak Process in Soils of Small River Valleys in the Taiga-Forest Zone in Relation to the Production of Potassium Salts // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53, № 4. P. 512–522.
2. Шишконокова Е. А. Антропогенная растительность территорий предприятий ОАО «Уралкалий» (Пермская область) // Социально-экологические технологии. 2017. № 3. С. 65–79.
3. Розенцвет О. А., Нестеров В. Н., Богданова Е. С. Структурные и физиолого-биохимические аспекты солеустойчивости галофитов // Физиология растений. 2017. Т. 64, № 4. С. 251–265.
4. Классификация и диагностика почв России / отв. ред. Г. В. Добровольский. Смоленск : Ойкумена, 2004. 342 с.
5. Веселов Д. С., Маркова И. В., Кудоярова Г. Р. Реакция растений на засоление и формирование солеустойчивости // Успехи современной биологии. 2007. Т. 127, № 5. С. 482–493.
6. Карташов А. В., Радюкина Н. Л., Иванов Ю. В. Роль систем антиоксидантной защиты при адаптации дикорастущих видов растений к солевому стрессу // Физиология растений. 2008. Т. 55, № 4. С. 516–522.
7. Guo R., Yang Z., Li F. [et al.]. Comparative metabolic responses and adaptive strategies of wheat (*Triticum aestivum*) to salt and alkali stress // BMC Plant Biology. 2015. Vol. 15, № 1. P. 170.
8. Genc Y., Taylor J., Lyons G. Bread wheat with high salinity and sodicity tolerance // Frontiers in plant science. 2019. Vol. 10. P. 1280.
9. Mäser P., Gierth M. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants // Progress in Plant Nutrition : Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium. Dordrecht : Springer, 2002. P. 43–54.
10. Volkov V., Beilby M. J. Salinity tolerance in plants: Mechanisms and regulation of ion, 24 transport // Frontiers in plant science. 2017. Vol. 8. P. 1795.
11. Chen S., Xing J., Lan H. Comparative effects of neutral salt and alkaline salt stress on seed germination, early seedling growth and physiological response of a halophyte species *Chenopodium glaucum* // African Journal of Biotechnology. 2012. Vol. 11, № 40. P. 9572–9581.
12. Cuin T. A., Betts S. A., Chalmandrier R. A root's ability to retain K^+ correlates with salt tolerance in wheat // Journal of experimental botany. 2008. Vol. 59, № 10. P. 2697–2706.
13. Szczerba M. W., Britto D. T., Kronzucker H. J. K^+ transport in plants: physiology and molecular biology // Journal of plant physiology. 2009. Vol. 166, № 5. P. 447–466.
14. Шуйская Е. В., Рахманкулова З. Ф., Суяндукоев Я. Т. Генетическое разнообразие однолетних ксеро-галофитов сем. *Chenopodiaceae* по градиентам влажности и засоления // Экология. 2019. № 1. С. 15–21.

15. Maathuis F. J. M., Amtmann A. K^+ nutrition and Na^+ toxicity: the basis of cellular K^+/Na^+ ratios // *Annals of botany*. 1999. Vol. 84, № 2. P. 123–133.
16. Четина О. А., Еремченко О. З. Влияние NaCl-засоления на содержание катионов Na^+ , K^+ , Ca^{2+} в листьях злаков при разной реакции почвенной среды // *АгроЭкоИнфо*. 2022. № 1. С. 1–13.
17. Mori I. C., Schroeder J. I. Reactive oxygen species activation of plant Ca^{2+} channels. A signaling mechanism in polar growth, hormone transduction, stress signaling, and hypothetically mechanotransduction // *Plant physiology*. 2004. Vol. 135, № 2. P. 707–708.
18. Колупаев Ю. Е., Карпец Ю. В. Формирование адаптивных реакций растений на действие абиотических стрессоров. Киев : Основа, 2010. 352 с.
19. Терлецкая Н. В., Сарсенбаев Б. А., Киршибаев Е. А. Влияние засоления на ионный баланс в корнях и листьях проростков пшениц с различным геномным составом // *Известия НАН РК. Серия биологическая*. 2011. № 4. С. 64–70.

References

1. Eremchenko O.Z., Pakhorukov I.V., Shestakov I.E. Development of the Solonchak Process in Soils of Small River Valleys in the Taiga-Forest Zone in Relation to the Production of Potassium Salts. *Eurasian Soil Science*. 2020;53(4):512–522.
2. Shishkonakova E.A. Anthropogenic vegetation of the territory of "Uralkali" enterprises (Perm Region). *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii = Social and ecological technologies*. 2017;(3):65–79. (In Russ.)
3. Rozentsvet O.A., Nesterov V.N., Bogdanova E.S. Structural and physiological-biochemical aspects of salt tolerance of halophytes. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 2017;64(4):251–265. (In Russ.)
4. Dobrovolskiy G.V. (resp. ed.) *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii = Soil classification and diagnostics in Russia*. Smolensk: Oykumena, 2004:342. (In Russ.)
5. Veselov D.S., Markova I.V., Kudoyarova G.R. Plant response to salinity and the formation of salt tolerance. *Uspekhi sovremennoy biologii = Achievements of modern biology*. 2007;127(5):482–493. (In Russ.)
6. Kartashov A.V., Radyukina N.L., Ivanov Yu.V. The role of antioxidant defense systems in the adaptation of wild plant species to salt stress. *Fiziologiya rasteniy = Plant physiology*. 2008;55(4):516–522. (In Russ.)
7. Guo R., Yang Z., Li F. [et al.]. Comparative metabolic responses and adaptive strategies of wheat (*Triticum aestivum*) to salt and alkali stress. *VMS Plant Biology*. 2015;15(1):170.
8. Genc Y., Taylor J., Lyons G. Bread wheat with high salinity and sodicity tolerance. *Frontiers in plant science*. 2019;10:1280.
9. Mäser P., Gierth M. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants. *Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium*. Dordrecht: Springer, 2002:43–54.
10. Volkov V., Beilby M.J. Salinity tolerance in plants: Mechanisms and regulation of ion, 24 transport. *Frontiers in plant science*. 2017;8:1795.
11. Chen S., Xing J., Lan H. Comparative effects of neutral salt and alkaline salt stress on seed germination, early seedling growth and physiological response of a halophyte species *Chenopodium glaucum*. *African Journal of Biotechnology*. 2012;11(40):9572–9581.
12. Cuin T.A., Betts S.A., Chalmandrier R. A root's ability to retain K^+ correlates with salt tolerance in wheat. *Journal of experimental botany*. 2008;59(10):2697–2706.
13. Szczerba M.W., Britto D.T., Kronzucker H.J. K^+ transport in plants: physiology and molecular biology. *Journal of plant physiology*. 2009;166(5):47–466.
14. Shuyskaya E.V., Rakhmankulova Z.F., Suyundukov Ya.T. Genetic diversity of annual xero-halophytes of the fam. *Chenopodiaceae* along humidity and salinity gradients. *Ekologiya = Ecology*. 2019;(1):15–21. (In Russ.)
15. Maathuis F.J.M., Amtmann A. K^+ nutrition and Na^+ toxicity: the basis of cellular K^+/Na^+ ratios. *Annals of botany*. 1999;84(2):123–133.
16. Четина О.А., Еремченко О.З. Influence of NaCl-salinization on the content of Na^+ , K^+ , Na^{2+} cations in grass leaves under different reactions of the soil environment. *АгроЭкоИнфо*. 2022;(1):1–13. (In Russ.)
17. Mori I.C., Schroeder J.I. Reactive oxygen species activation of plant Ca^{2+} channels. A signaling mechanism in polar growth, hormone transduction, stress signaling, and hypothetically mechanotransduction. *Plant physiology*. 2004;135(2):707–708.
18. Kolupaev Yu.E., Karpets Yu.V. *Formirovanie adaptivnykh reaktsiy rasteniy na deystvie abioticheskikh stressorov = Formation of adaptive responses of plants to the action of abiotic stressors*. Kiev: Osнова, 2010:352.
19. Terletskaia N.V., Sarsenbaev B.A., Kirshibaev E.A. Effect of salinity on the ionic balance in the roots and leaves of wheat seedlings with different genomic compositions. *Izvestiya NAN RK. Seriya biologicheskaya = Proceedings of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Biological series*. 2011;(4):64–70. (In Russ.)