

Оценка потенциального риска хлоридов и их влияние на всхожесть семян и развитие проростков растений

© 2024. Л. П. Воронина^{1,2}, д. б. н., В. Л. Флерчук¹, аспирант,
К. Э. Поногайбо², м. н. с., А. В. Сбитнев², н. с.,
Мостафа Абделкадер^{1,3}, стажёр, д. с.-х. н.,
¹МГУ имени М.В. Ломоносова,
119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1., стр. 12,
²ФГБУ «ЦСП» ФМБА России,
119121, Россия, г. Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 1,
³Университет Сохаг,
82524, Египет, г. Тассер,
e-mail: Luydmila.voronina@gmail.com

В статье обсуждается негативный эффект, установленный по результатам фитотестирования противогололёдных материалов (ПГМ) и солей, являющихся их компонентами, на всхожесть и развитие проростков растений. Рассматривается влияние присутствия катионов натрия, калия и аниона хлора на изменение показателя фитотоксичности. Выполнен анализ динамики отклика тест-растений по ряду тест-показателей в зависимости от концентрации основных солей, присутствующих в ПГМ, перспективным методом фитотестирования. Результаты статистического анализа убедительно доказывают высокую фитотоксичность хлорида натрия (NaCl) в отношении таких показателей развития ювенильного тест-растения, как всхожесть, длина первичного корешка и высота coleoptily. Повышение концентрации NaCl в растворе с 0,75 до 1% сопровождается выраженной токсичностью для тест-растений (более 50%). Хлорид калия (KCl) в интервале концентраций 0,1–1,0% не проявлял фитотоксичность. Присутствие KCl в противогололёдном реагенте, представленном NaCl, сопровождается снижением фитотоксичности и позволяет перевести показатель токсичности реагента с уровня «опасно токсичного» до уровня «умеренно токсичного».

Ключевые слова: противогололёдный материал (ПГМ), хлорид натрия, хлорид калия, всхожесть семян, фитотоксичность, засоление.

The assessment of potential risks of chloride salts and their effect on seed germination and plant development

© 2024. L. P. Voronina^{1,2} ORCID: 0000-0003-1917-7490^{*}
V. L. Flerchuk¹ ORCID: 0009-0002-7958-7459^{*} K. E. Ponogaybo² ORCID: 0000-0002-0518-0982^{*}
A. V. Sbitnev² ORCID: 0000-0003-4406-4287^{*} M. Abdelkader^{1,3} ORCID: 0000-0003-2339-5087^{*}
¹Lomonosov Moscow State University,
1-12, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,
²Centre for Strategic Planning of FMBA of Russia,
10-1, Pogodinskaya St., Moscow, Russia, 119121,
³Sohag University,
Sohag University, Egypt, 82524,
e-mail: Luydmila.voronina@gmail.com

The article discusses the negative effect of de-icing materials (DM) and salts in their composition on plant seedlings germination and development. The influence of sodium and potassium cations and chlorine anion on phytotoxicity index is considered. The dynamics of test-plants (*Avena sativa* L., *Raphanus sativa* L., *Hordeum vulgare* L.) response on a number of test-indicators depending on the concentration of basic salts in DM by a promising method of phytotesting was analyzed. The analyzed DMs in concentrations higher than 1% have an inhibitory effect. The DM at 14–16 g/L suppresses root length of test plants (more than 50%) relative to the control. The low content of heavy metals, such as Cd, Cu, Pb, in the analyzed DM samples indicates the toxicity of sodium chloride as an active de-icing agent. The results of statistical analysis convincingly prove the high phytotoxicity of sodium chloride (NaCl) in relation to such indicators

of the juvenile test-plant development as germination, the primary root length and the coleoptile height. Increasing the NaCl concentration in the solution from 0.75 to 1% was strongly toxic to the test-plants (more than 50%). Potassium chloride (KCl) in the concentration range of 0.1–1.0% showed no phytotoxicity. The KCl presence in the NaCl-included de-icing reagent reduces its phytotoxicity and allows the toxicity level of the agent to be assessed as “moderately toxic”.

Keywords: deicing material (DM), sodium chloride, potassium chloride, seed germination, phytotoxicity, salinity.

Под экологическим стрессом для растений понимается любой внешний фактор, способный оказать негативное влияние на их состояние. Абиотический стресс обоснован присутствием в окружающей среде опасных химических соединений – поллютантов, в том числе тяжёлых металлов и ксенобиотиков [1]. Противогололёдные материалы (ПГМ), являясь важнейшим фактором безопасности дорожного движения в зимний период, способны негативно воздействовать на окружающую среду, особенно в городах [2–5]. ПГМ представляют собой многокомпонентные химические реагенты, состоящие из различных органических и неорганических солей (ОДН 218.2.027-2003). На территории г. Москвы используются жидкие и твёрдые ПГМ, применение которых регламентируется в соответствии с нормативными документами (ОДН 218.2.027-2003, ГОСТ 33387-2015).

В большинстве случаев в состав ПГМ входят хлориды натрия (50–85%), калия (20–25%) и кальция (15–20%). Ионы других солей в составе противогололёдных реагентов содержатся в небольших количествах, в основном это сульфаты или нитраты кальция. Данные виды солей попадают в почву после таяния

льда и снега, способствуя засолению почв [2, 5, 6]. Другая часть химических компонентов ПГМ попадает в поверхностные и подземные водные системы и в конечном итоге сбрасывается в городские водотоки в виде основного стока [7].

В свою очередь изменения свойств почвы под действием насыщенных солями талых вод могут нанести вред росту и развитию растений. Фитотоксическое действие компонентов ПГМ проявляется как в виде морфологических изменений у растений (отмирание корней, скручивание листьев, увядание растения и др.), так и в виде физиологических процессов (изменение структуры хлоропластов, снижение содержания крахмала, ослабление фотосинтеза), способствуя абиотическому стрессу [2, 8–10].

Противогололёдные материалы, используемые в зимний период, в основном, представлены хлоридами натрия, магния, кальция и ацетатами калия, магния. Из всех используемых веществ в последнее время, как в России, так и в других странах, в основном, применяются соли на основе хлоридов [3, 6, 11]. Одним из значимых факторов, обуславливающих последствия от применения ПГМ,

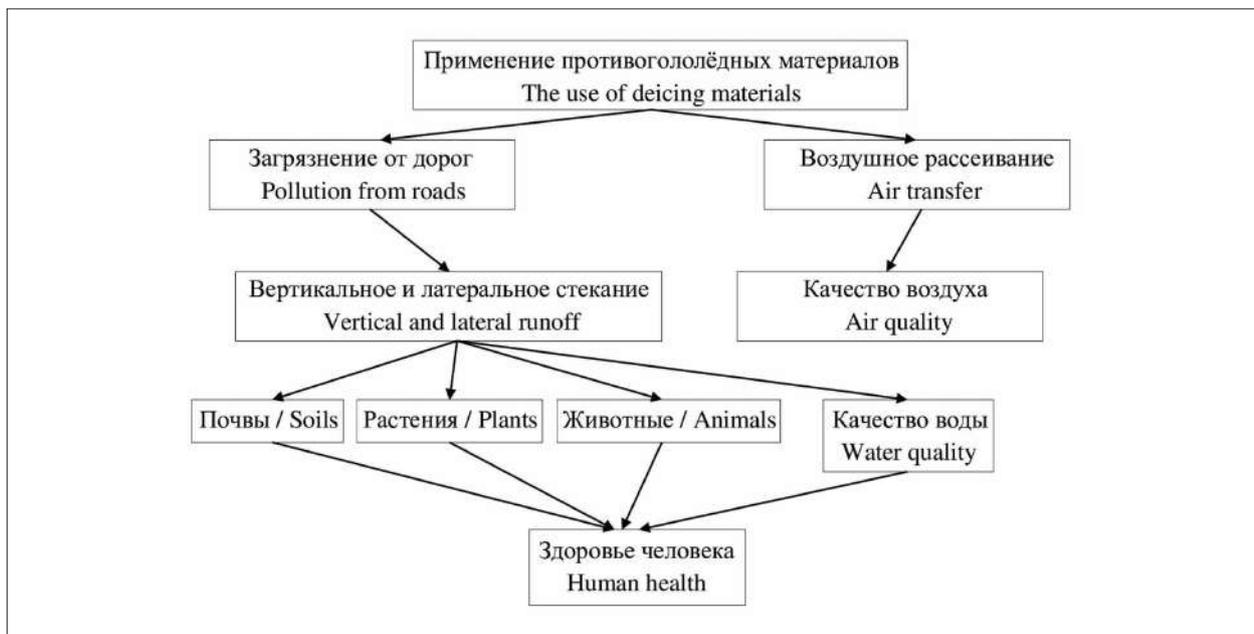


Рис. 1. Схема влияния противогололёдных реагентов на объекты окружающей среды и здоровье человека
Fig. 1. Scheme of the de-icing agents impact on environment and humans

представленных на рисунке 1, является их масштабное использование в количестве 150–500 тыс. т/год в г. Москве при норме расхода от 40 до 150 г/м² [3, 11].

Значительное превышение норм расхода ПГМ может быть обусловлено аномальными климатическими факторами, которые сопровождаются увеличением норм внесения. Городское озеленение выполняет важную рекреационную функцию, но его эффективность снижается вследствие значительных физико-химических и функциональных изменений в почвах, связанных с поступлением в экосистему высоких концентраций смесей хлоридных солей и тяжёлых металлов. Такая ситуация обуславливает не только увеличение токсичности в объектах окружающей среды, но оказывает воздействие и на здоровье человека [12, 13]. Накопление солей в корнеобитаемом слое почв приводит к угнетению, а в ряде случаев и к гибели растений. Большинство культур очень чувствительны к засолению почвы из-за осмотического стресса, способствующего физиологической засухе [14]. Такие элементы, как натрий и хлор, оказывают определённое токсическое воздействие на растения. Значительное накопление натрия в клеточных стенках может быстро привести к осмотическому стрессу и гибели клеток [8, 14]. Растения, чувствительные к этим элементам, могут пострадать при незначительных концентрациях солей, в случае содержания в почве других токсикантов, например, тяжёлых металлов, негативное воздействие усиливается.

В связи с выраженным негативным воздействием на объекты окружающей среды компонентов ПГМ актуальным является поиск способов сохранения растений на урбанизированных территориях. Поскольку важным и весьма чувствительным к высоким концентрациям солей является этап начала развития растений, представляется актуальным определить влияние разных концентраций солей на развитие растений, используя семена разных видов растений в серии фитотестов.

Цель настоящей статьи – оценка фитотоксичности хлоридных солей, присутствующих в составе ПГМ, для поиска способов снижения их негативного воздействия.

Материалы и методы

Определение химического состава ПГМ. Снег является транзитной средой для накопления элементов, входящих в состав ПГМ и других поллютантов, при их поступлении

и распределении в почве. В настоящее время в г. Москве основными индикаторными для мониторинга и широко используемыми компонентами ПГМ являются хлориды натрия, в которых зачастую присутствуют и другие катионы. Химический анализ ПГМ включал определение катионов: Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, тяжёлых металлов, таких как Cd, Cu, Pb и питательных элементов, таких как фосфор и сера. Анализ проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС Agilent 7700) [15]. Для определения аниона хлора использовали ионную хроматографию (ISO 11269-2, 1995). Метод основан на хроматографическом разделении анионов за счёт их различной подвижности в процессе миграции по ионной хроматографической колонке.

Оценка фитотоксичности ПГМ. Фитотестирование ПГМ в лабораторных условиях выполнено с использованием теста на прорастание семян и формирование первичного корешка овса посевного (*Avena sativa* L.) в чашках Петри в соответствии с методикой [16]. Обращение именно к этому методу обусловлено процедурой определения класса опасности для производимых ПГМ и определением их суммарной токсичности. Для эксперимента готовили растворы противогололёдных солей в концентрации от 0,5 до 20 г/л, которые затем тестировали на семенах овса. Выбор рабочих концентраций обусловлен расчётами применения ПГМ в г. Москве. Фитотоксичность исследуемых образцов оценивали по величине фитоэффектов, отражающих ответную реакцию растений (всхожесть, длину корней и проростков) на различную концентрацию солей, содержащихся в составе ПГМ. Фитоэффект (Ет) – эффект торможения, отражающий ингибирование роста корней растений на 20% и более от контроля. Фитоэффект, представленный на графиках, отражает ингибирование роста корней тест-культуры овса на 50% относительно контроля.

Оценка фитотоксичности солей NaCl и KCl. В ходе эксперимента фитотоксичность определяли путём испытания различных концентраций основного компонента ПГМ – соли хлорида натрия NaCl, а также хлорида калия (KCl), присутствующего в качестве дополнительного/сопровождающего компонента. Каждую из испытываемых солей NaCl и KCl тестировали в серии 5 концентраций (в %): 0,1; 0,25; 0,5; 0,75; 1. В качестве контроля использовали дистиллированную воду.

Для оценки влияния концентрации хлоридных солей на рост и созревание растений

Таблица 1 / Table 1

Критерии фитотоксичности / Phytotoxicity criteria

Степень фитотоксичности Degree of toxicity	Степень изменения всхожести, длины корня и высоты проростка по сравнению с контролем (N_1, N_2, N_3), % The degree of germination, root length, and seedling height compared to control (N_1, N_2, N_3), %
V – практически не токсичные V – practically non-toxic	$0 < N \leq 20$
IV – малотоксичные IV – low toxicity	$20 < N \leq 50$
III – умеренно токсичные III – moderately toxic	$50 < N \leq 70$
II – опасно токсичные II – dangerously toxic	$70 < N < 100$
I – высоко опасно токсичные I – highly dangerously toxic	$N = 100$

был поставлен второй лабораторный опыт на семенах редиса (*Raphanus sativa* L.) и ячменя (*Hordeum vulgare* L.). В соответствии с рекомендациями нами использованы две культуры (однодольные и двудольные), которые входят в перечень видов, представленных в нормативных документах, например, в ГОСТ 32627–2014, и обзорных статьях [17]. Для определения степени токсичности разных концентраций испытуемых солей элюатным биотестированием с помощью продуцентов (высших растений), представленных однодольными и двудольными растениями, использовали утверждённую методику ФР.1.39.2006.02264. Уровень токсичности диагностировался по снижению всхожести семян (N_1 , %), угнетению корней (N_2 , %) и нами добавленного тест-показателя по высоте ювенильного проростка (N_3 , %) по сравнению с контрольной пробой. Для определения степени фитотоксичности использовали критерии, представленные в таблице 1, устанавливающие изменения относительно контроля по каждому тест-параметру (всхожесть, длина корня и проростка), в соответствии с используемой методикой (ФР 1.39.2006.02264).

Степень токсичности образца оценивалась по принципу наибольшей экологической безопасности с учётом всех показателей (N_1, N_2, N_3).

Статистический анализ. Все анализы выполнены с повторностью $n \geq 3$, приведены средние значения \pm ошибка среднего, N – степень изменения контролируемого параметра (всхожесть/длина корней или проростка) вычислены в % относительно контрольного образца. В случае нормального распределения достоверность изменений оценивается по коэффициенту достоверности/отклонения (t_{Cr})

от коэффициента Стьюдента, с вероятностью $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение

Химический состав ПГМ. Характеристики исследованных противогололёдных образцов представлены в таблице 2. Отличительные свойства исследуемых образцов обусловлены различием количественного и качественного состава в отношении их основных компонентов (химических соединений). Компоненты, исследуемые в дальнейшем нами в виде чистых солей, могут быть представлены в химических и комбинированных материалах, а также в твёрдой и в жидкой форме.

По данным элементного анализа в составе ПГМ₁ в наибольшем количестве содержится натрий (Na – 36,4%), кальций (Ca – 3,2%), анион хлора (Cl – 48,8%). Концентрация калия в ПГМ₁ не более 0,02%, серы (S) – 0,001%. На долю таких элементов, как кремний (Si), магний (Mg) и цинк (Zn), приходилось менее 0,0001%. На долю большинства элементов, относящихся к группе «тяжёлых металлов», приходится не более 0,0001% (As, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Cu).

На основании полученных аналитических данных следует отметить, что в количественном отношении преобладающим компонентом ПГМ₁ является хлорид натрия; его содержание достигает уровня 88%. Вторым по величине компонентом является хлорид кальция ($CaCl_2$), на долю которого приходится 8%. Содержание хлорида калия (KCl) незначительное – менее 0,5%. Заявленный производителем состав ПГМ₁ (92% NaCl и 9% $CaCl_2$) немного выше реальных величин. Количественные характеристики идентифициро-

Таблица 2 / Table 2

Количественные характеристики идентифицированных элементов в исследованных противогололёдных материалах (ПГМ) / Quantitative characteristics of the identified elements in the tested deicing materials (DM)

Элементы / The elements	ПГМ ₁ , г/кг DM ₁ , g/kg	ПГМ ₂ , г/л DM ₂ , g/L
Na	364,0	32,6
Cl	428,8	165,2
Ca	32,4	76,8
K	2,0	–
S	0,145	–
Si	0,049	–
Mg	0,02	0,08
Zn	0,002	0,006
Cr	–	0,006
As, Cd, Pb, Cr, Ni, Co, Cu	< 0,01	–
As, Pb, Ni, Co, Cu, Si, Al	–	< 0,041

Примечание: «–» – содержание ниже предела обнаружения методики измерения.
Note: «–» – content is below the detection limit of the measurement technique.

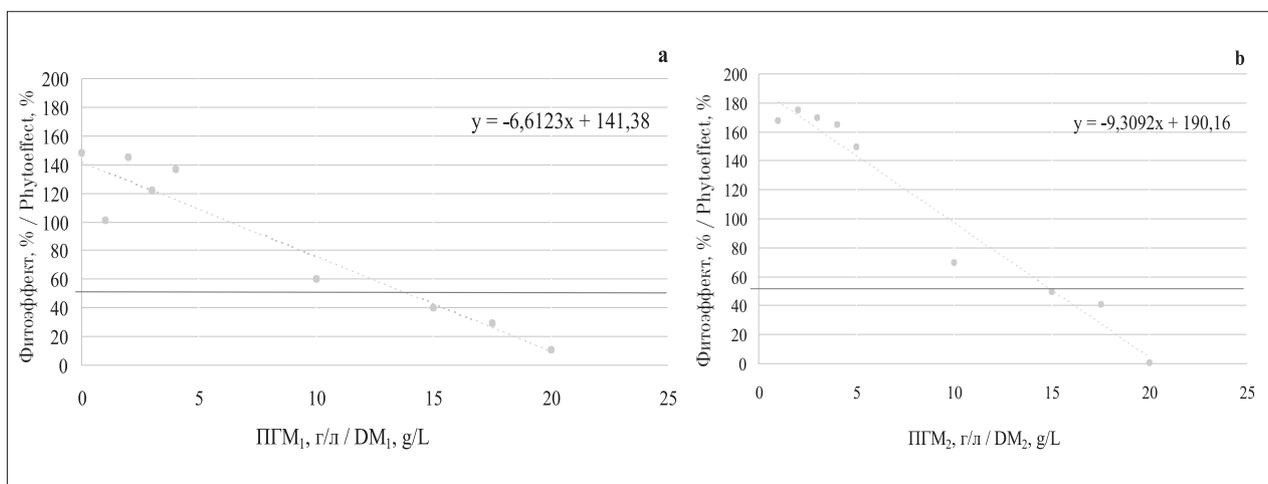


Рис. 2. Динамика фитотоксического эффекта при воздействии различных концентраций ПГМ₁ (a) и ПГМ₂ (b) на тест-культуру *Avena sativa*
Fig. 2. The phytotoxic effect dynamics with various DM₁ (a) and DM₂ (b) concentrations applied to the *Avena sativa* test culture

ванных элементов в ПГМ₁ и ПГМ₂ приведены в таблице 2. Результаты элементного анализа ПГМ₂, который является жидким реагентом, свидетельствуют о том, что преобладающими элементами являются кальций Ca (7,6%), натрий Na (3,2%) и хлор Cl (16,5%). Содержание других элементов, относящихся к щелочным и щелочноземельным металлам, незначительно – массовая доля Mg²⁺ составляет 0,01%. На долю Zn, As, Cr, Ni, Cu, Cd и Pb приходится менее 0,001% (по массе). Концентрации основных компонентов в жидком ПГМ₂, представленные в таблице 2, свидетельствуют о том, что исследуемый противогололёдный реагент представляет собой смесь солей CaCl₂ (23%) и NaCl (8%) в соотношении 3:1.

Экотоксикологическая оценка ПГМ (в соответствии с определением класса опасности вещества). Согласно результатам эксперимента установлена зависимость длины корней тест-культуры *Avena sativa* L. от концентрации вещества. Характер изменений для каждого ПГМ описывается конкретным линейным уравнением, представленным на рисунке 2. Выраженное (20%) усиление фитоэффекта при увеличении концентрации для ПГМ₁ происходит в диапазоне от 5 до 20 г/л (рис. 2a) и достигает 50% (Et₅₀), на уровне концентрации 13,8 г/л (x = 13,8).

Количественные характеристики основных химических компонентов в различных концентрациях растворов ПГМ₂, исполь-

Таблица 3 / Table 3

Оценка фитотоксичности NaCl по всхожести и прорастанию семян редиса и ячменя
Phytotoxicity assessment of NaCl salt on germination of radish and barley seeds

Показатель Indicator		Редис / Radish (n = 4, P = 0,95; t _{ст} = 1,72)						Ячмень / Barley (n = 4, P = 0,95; t _{ст} = 1,19)					
		Контроль Control	NaCl, 0,1%	NaCl, 0,25%	NaCl, 0,5%	NaCl, 0,75%	NaCl, 1%	Контроль Control	NaCl, 0,1%	NaCl, 0,25%	NaCl, 0,5%	NaCl, 0,75%	NaCl, 1%
Всхожесть / Germination	Проросшие семена Germinated seeds	7,5	7,8	8,0	5,3	5,0	3,5	6	6,5	6,25	4,75	3,8	3,0
	%	100	104	107	71	67	47	100	108	104	79	63	50
	t	–	0,14	0,29	1,3	1,4	2,55	–	0,21	0,81	1,69	2,8	2,51
	N ₁ *	–	–4	–7	29	33	53	–	–8	–4	21	37	50
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	V	V	IV	III	–	V	V	V	IV	III
Корень / Root	Длина, см Length, cm	3,7	4,2	3,6	4,0	2,1	0,8	5,1	6,6	6,0	4,4	3,2	1,2
	%	100	114	98	106	69	20	100	127	121	86	58	24
	t	–	0,41	0,06	0,18	0,92	3,24	–	1,49	0,84	0,89	1,2	2,55
	N ₂ **	–	–14	2	–6	31	80	–	–27	–21	14	42	76
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	V	V	IV	II	–	V	V	V	IV	II
Проросток / Shoot	Длина, см Length, cm	4,6	5,1	5,5	4,0	2,3	1,3	5,3	6,6	6,3	4,3	2,4	1,2
	%	100	112	120	88	52	28	100	120	122	80	44	18
	t	–	0,45	1,48	0,43	2,15	5,1	–	0,71	0,8	0,82	2,04	3,82
	N ₃ ***	–	–12	–20	12	48	72	–	–20	–22	20	56	82
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	V	V	IV	II	–	V	V	IV	III	II
Суммарная степень токсичности Total degree of toxicity		–	V	V	V	IV	II	–	V	V	V	IV	II

Примечание к таблицам 3–5: *N₁ – степень изменения всхожести семян по сравнению с контрольным образцом, %; **N₂ – степень изменения длины корней по сравнению с контрольным образцом, %; ***N₃ – степень изменения высоты проростков по сравнению с контрольным образцом, %; «–» – показатель не имеет смысла.

Note to Tables 3–5: *N₁ – the degree of change in seed germination compared to the reference (control) sample, %; **N₂ – the degree of change in the length of the roots compared to the control sample, %; ***N₃ – the degree of change in the height of seedlings compared to the control sample, %; “–” – the indicator makes no sense.

зубных в фитотестировании, представлены на рисунке 2б. При изменении длины проросших корней *A. sativa* было установлено, что фитотоксичность ПГМ₂ начинает проявляться с концентрации 7 г/л и соответствует при заданной концентрации 20%. При увеличении концентрации ПГМ₂ отмечается усиление фитотоксического действия. Более высокая степень фитотоксичности отмечается при

концентрациях ПГМ₂ ≥ 15 г/л (≥ 50%), а в концентрации 20 г/л достигает 100%.

Оценка фитотоксичности хлоридных солей. Результаты фитотестирования хлорида натрия представлены в таблице 3. Значимые эффекты фитотоксичности (47%) соли NaCl по тест-показателю всхожести семян редиса установлены при её концентрации 1%, по тест-показателю всхожести семян ячменя –

Таблица 4 / Table 4

Оценка фитотоксичности KCl по всхожести и прорастанию семян редиса и ячменя
Phytotoxicity assessment of KCl salt on germination of radish and barley seeds

Показатель Indicator		Редис / Radish (n = 4, P = 0,95; t _{st} = 1,09)						Ячмень / Barley (n = 4, P = 0,95; t _{st} = 0,82)					
		Контроль Control	KCl, 0,1%	KCl, 0,25%	KCl, 0,5%	KCl, 0,75%	KCl, 1%	Контроль Control	KCl, 0,1%	KCl, 0,25%	KCl, 0,5%	KCl, 0,75%	KCl, 1%
Всхожесть / Germination	Проросшие семена Germinated seeds	7	7,75	7,25	7,20	7,20	6,7	6,5	6,75	6,5	6,20	6,20	5,8
	%	100	111	104	103	103	96	100	104	100	95	95	89
	t	–	0,25	0,23	0,71	0,71	0,91	–	0,32	0,21	0,85	0,85	0,89
	N ₁	–	–11	–4	–3	–3	4	–	–4	0	5	5	11
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	V	V	V	V	–	V	V	V	V	V
Корень / Root	Длина, см Length, cm	3,9	4,9	4,6	4,2	4,0	3,2	5,1	4,5	5,4	4,6	4,7	4,0
	%	100	132	124	114	108	82	100	88	106	91	93	79
	t	–	1,03	0,71	0,44	0,19	1,07	–	0,23	0,3	0,31	0,28	0,78
	N ₂	–	–32	–24	–14	–8	18	–	12	–6	9	7	21
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	V	V	V	V	–	V	V	V	V	V
Проросток / Shoot	Длина, см Length, cm	4,6	5,7	5,4	4,4	2,6	2,7	5,3	3,8	5,8	4,2	3,5	3,2
	%	100	125	119	97	57	59	100	72	109	79	66	61
	t	–	0,78	0,59	0,23	1,6	1,8	–	0,53	0,31	0,76	1,17	1,82
	N ₃	–	–25	–19	3	43	41	–	28	–9	21	34	39
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	V	V	IV	IV	–	IV	V	IV	IV	IV
Суммарная степень токсичности Total degree of toxicity		–	V	V	V	V	V	–	V	V	V	V	V

при более низких концентрациях – 0,75 и 1% (фитотоксичность 63 и 50% соответственно). Оценка степени токсичности образцов, выполненная в соответствии с критериями (табл. 1), свидетельствует об отнесении их к IV (малотоксичные) и III (умеренно токсичные) уровням в зависимости от концентраций соли (0,75 и 1% соответственно). Значимые эффекты фитотоксичности 1% концентрации соли NaCl установлены и по другим тест-показателям, а именно: длине корней – равны 20% для тест-культуры редиса и 24% для тест-культуры ячменя; высоте проростков – 28% для редиса и 18% для ячменя, что соответствовало II

(опасно токсичные) степени токсичности. Суммарная токсичность по результатам измерения трёх тест-показателей одинакова и соответствовала IV степени (малотоксичные вещества) при концентрации соли 0,75% и II степени (опасно токсичные) при концентрации 1%.

Результаты фитотестирования хлорида калия представлены в таблице 4. Существенного влияния токсичности KCl на всхожесть семян, длину корней и длину побегов не выявлено. Токсичность испытуемых концентраций соли KCl соответствовала V степени (практически не токсична).

Результаты фитотестирования хлоридов натрия и калия при их совместном действии представлены в таблице 5. Значимые эффекты фитотоксичности на всхожесть семян получены при концентрации 1% (69% для редиса и 62% для ячменя). Степень токсичности образцов получена одинаковой для обеих культур и соответствовала IV. Значимые эффекты фитотоксичности по тест-показателю длине корней получены при концентрации 1% и только для тест-культуры редиса (35%). Степень токсичности образца соответствовала III. Значимые эффекты фитотоксичности по тест-показателю длине/высоте проростков получены при концентрации 1% по тест-культуре редису (50%), что соответствует III степени токсичности. Суммарная токсичность по результатам измерения трёх тест-показателей соответствует

III степени. Совместное действие солей снижает степень токсичности присутствующей в растворе 1% концентрации NaCl на один порядок (снижение уровня токсичности со II до III степени).

Как было показано ранее, высокие концентрации NaCl, поступающие с ПГМ, оказывают негативное влияние на растения. В природе это влияние ПГМ опосредовано через воздействие на среду обитания растений, почву, то есть её структуру и экологическую характеристику, которая связана с изменением её химического состава, в частности, концентрации катионов натрия. Данные изменения обусловлены нарушениями, происходящими в результате ионного обмена между Na^+ и основными питательными веществами, такими как Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , что создаёт дефицит

Таблица 5 / Table 5

Оценка фитотоксичности солей (NaCl+ KCl) по всхожести и прорастанию семян
Phytotoxicity assessment of (NaCl+ KCl) salts on germination of radish and barley seeds

Показатель Indicator		Редис / Radish (n = 4, P = 0,95; t _{st} = 2,14)			Ячмень / Barley (n = 4, P = 0,95; t _{st} = 1,17)		
		Контроль Control	NaCl+KCl, 0,75%	NaCl+KCl, 1%	Контроль Control	NaCl+KCl, 0,75%	NaCl+KCl, 1%
Всхожесть / Germination	Проросшие семена Germinated seeds	6,5	5,75	4,5	6,5	6,0	4,0
	%	100	88	69	100	92	62
	t	–	1,02	2,55	–	0,32	3,12
	N ₁	–	12	31	–	8	38
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	IV	–	V	IV
Корень / Root	Длина, см Length, cm	3,8	3,3	1,3	6,4	5,4	3,8
	%	100	88	35	100	84	60
	t	–	0,48	2,92	–	0,52	1,09
	N ₂	–	12	65	–	16	40
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	III	–	V	IV
Проросток / Shoot	Длина, см Length, cm	2,7	2,7	1,4	6,0	4,3	2,9
	%	100	100	50	100	72	49
	t	–	0,01	2,97	–	1,19	1,72
	N ₃	–	0	50	–	28	51
	Степень токсичности Toxicity degree	–	V	III	–	IV	III
Суммарная степень токсичности / Total degree of toxicity		–	V	III	–	V	IV

питательных веществ для растений. Хлорид натрия, обладающий высокой подвижностью, активно влияет на процессы высыхания и увлажнения, повышает электропроводность почвенного раствора, а также способствует нарушению устойчивости структуры почвы и появлению осмотического стресса, тем самым оказывая негативное воздействие не только на растения, но и на окружающую среду. Таким образом, установленная в лабораторных экспериментах положительная роль ионов калия свидетельствует о восполнении дефицита питательных веществ, в частности калия. Между тем, следует учитывать, что в натуральных условиях ПГМ аккумулируется вдоль автомобильных дорог, в результате возникает необходимость учёта ещё одного опасного механизма их действия – поступление металлов, что усиливает их негативное воздействие на растения. Дополнительное присутствие биофильных элементов, обладающих противогололёдными свойствами и обеспечивающих растениям дополнительное питание, снижает/ослабляет негативное действие основных компонентов ПГМ, ионов натрия и хлора.

Выводы

Проанализированные нами ПГМ в концентрациях выше 1% оказывают ингибирующее воздействие, 50% угнетение длины корешка тест-растения относительно контроля проявляется в концентрациях ПГМ 14–16 г/л.

Повышение концентрации хлорида натрия (NaCl) с 0,75 до 1% сопровождается выраженной токсичностью для тест-растений (более 50%).

Установлено отсутствие негативного действия хлорида калия в диапазоне концентраций от 0,1 до 1%. Данное соединение не оказывает отрицательного влияния на показатели фитотоксичности и может относиться к категории «практически нетоксичных» веществ для растений.

Показана эффективность комбинированного использования хлористого натрия с хлористым калием для снижения негативного воздействия на растения.

Литература

1. Rhodes D., Nadolska-Orczyk A. Plant stress physiology // *Encycl. Life Sci.* 2001 [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.1038/npg.els.00012972> (Дата обращения: 23.10.2023).

2. Королев В.А., Соколов В.Н., Самарин Е.Н. Оценка эколого-геологических последствий применения в Москве противогололёдных реагентов // *Инженерная геология.* 2009. № 1. С. 34–43.

3. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е., Хайбрахманов Т.С. Экологические последствия применения противогололёдных реагентов для почв Восточного округа Москвы // *Вестник Московского университета. Серия 5. География.* 2016. № 3. С. 40–49.

4. Shrivastava P., Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation // *Saudi journal of biological sciences.* 2015. V. 22. No. 2. P. 123–131. doi: 10.1016/j.sjbs.2014.12.001

5. Fay L., Shi X. Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: state of the knowledge // *Water, Air, & Soil Pollution.* 2012. V. 223. No. 5. P. 2751–2770. doi: 10.1007/s11270-011-1064-6

6. Воронина Л.П., Трибис Л.И., Поногайбо К.Э., Амелянчик О.А., Антропова Н.С. Характеристика снежной массы для индикации нагрузки применения противогололёдных реагентов // *Гигиена и санитария.* 2020. Т. 99. № 12. С. 1330–1338. doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1330-1338.

7. Howard K.W.F., Haynes J. Groundwater contamination due to road de-icing chemicals – salt balance implications // *Geoscience Canada.* 1993. V. 20. No. 1 [Электронный ресурс] <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3784> (Дата обращения: 23.10.2023).

8. Гладков Е.А., Евсюков С.В., Шевякова Н.И., Долгих Ю.И., Гладкова О.Н., Глушецкая Л.С. Влияние противогололёдных реагентов на газонные травы // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2016. Т. 18. № 5-1. С. 157–159.

9. Mladenov M.K., Yaneva S.A., Rangelova N.G. Studies of the toxic effect of heavy metals contained in contaminated soil on the germination and growth of higher plants // *Теоретическая и прикладная экология.* 2021. № 3. С. 198–204. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-198-204

10. Łuczak K., Czerniawska-Kusza I., Rosik-Dulewska C., Kusza G. Effect of NaCl road salt on the ionic composition of soils and *Aesculus hippocastanum* L. foliage and leaf damage intensity // *Scientific reports.* 2021. V. 11. No. 1. Article No. 5309. doi: 10.1038/s41598-021-84541-x.

11. Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В., Степанов А.Л., Мягкова А.Д., Курбатова А.С. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // *Почвоведение.* 2006. Т. 39. № 5. С. 603–615.

12. Малышева А.Г., Шелепова О.В., Водянова М.А., Донерьян Л.Г., Ушакова О.В., Юдин С.М. Экологические проблемы применения противогололёдных реагентов в условиях крупного мегаполиса (на примере территории города Москвы) // *Гигиена и санитария.* 2018. Т. 97. № 11. С. 1032–1037. doi: 10.18824/0016-9900-2018-97-11-1032-37

13. Doorn J., Storteboom T.T.R., Mulder A.M., de Jong W.H.A., Rottier B.L., Kema I.P. Ion chromatography for the precise analysis of chloride and sodium in sweat for the diagnosis of cystic fibrosis // *Annals of clinical biochemistry*. 2015. V. 52. No. 4. P. 421–427. doi: 10.1177/0004563214549642

14. Munns R. Comparative physiology of salt and water stress // *Plant, Cell & Environment*. 2002. V. 25. No. 2. P. 239–250. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x

15. Wilschefski S.C., Baxter M.R. Inductively coupled plasma mass spectrometry: introduction to analytical aspects // *The Clinical Biochemist Reviews*. 2019. V. 40. No. 3. P. 115–133. doi: 10.33176/AACB-19-00024

16. МР 2.1.7.2297–07 Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. 15 с.

17. Воронина Л.П., Понोगайбо К.Э. Подход к выбору методов фитотестирования для исследования почв // *Агрохимия*. 2021. № 9. С. 75–79. doi: 10.31857/S000218812109012X

References

1. Rhodes D., Nadolska-Orczyk A. Plant stress physiology // *Encycl. Life Sci.* 2001 [Internet resource] <https://doi.org/10.1038/npg.els.00012972> (Accessed: 23.10.2023).

2. Korolev V.A., Sokolov V.N., Samarin E.N. Assessment of the ecological and geological consequences of the use of de-icing reagents in Moscow // *Inzhenernaya geologiya*. 2009. No. 3. P. 34–43 (in Russian).

3. Nikiforova E.M., Kosheleva N.E., Khaibrakhmanov T.S. Ecological impact of the antiglaze treatment on soils of the Eastern district of Moscow // *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2016. No. 3. P. 40–49 (in Russian).

4. Shrivastava P., Kumar R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation // *Saudi journal of biological sciences*. 2015. V. 22. No. 2. P. 123–131. doi: 10.1016/j.sjbs.2014.12.001

5. Fay L., Shi X. Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: state of the knowledge // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2012. V. 223. No. 5. P. 2751–2770. doi: 10.1007/s11270-011-1064-6

6. Voronina L.P., Tribis L.I., Ponogaybo K.E., Amelyanchik O.A., Antropova N.S. Snow mass characteristics for the indication of the ice-melting products application load // *Gigiena i Sanitaria*. 2020. V. 99. No. 12. P. 1330–1338 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2020-99-12-1330-1338.

7. Howard K.W.F., Haynes J. Groundwater contamination due to road de-icing chemicals – salt balance

implications // *Geoscience Canada*. 1993. V. 20. No. 1 [Internet resource] <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3784> (Accessed: 23.10.2023).

8. Gladkov E.A., Evsyukov S.V., Shevyakova N.I., Dolgikh Yu.I., Gladkova O.N., Glushetskaya L.S. Effect of anti-icing reagents on lawn grasses // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2016. V. 18 No. 5-1. P. 157–159 (in Russian).

9. Mladenov M.K., Yaneva S.A., Rangelova N.G. Studies of the toxic effect of heavy metals contained in contaminated soil on the germination and growth of higher plants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. V. 3. P. 198–204. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-198-204

10. Łuczak K., Czerniawska-Kusza I., Rosik-Dulewska C., Kusza G. Effect of NaCl road salt on the ionic composition of soils and *Aesculus hippocastanum* L. foliage and leaf damage intensity // *Scientific reports*. 2021. V. 11. No. 1. Article No. 5309. doi: 10.1038/s41598-021-84541-x.

11. Smagin A.V., Azovtseva N.A., Smagina M.V., Stepanov A.L., Myagkova A.D., Kurbatova A.S. Criteria and methods to assess the ecological status of soils in relation to the landscaping of urban territories // *Pochvovedenie*. 2006. V. 39. No. 5. P. 603–615 (in Russian).

12. Malysheva A.G., Shelepova O.V., Vodianova M.A., Doneryan L.G., Ushakova O.V., Yudin S.M. Ecological and hygienic problems of the use of anti-icing reagents in a large metropolis (on the example of the territory of the city of Moscow) // *Gigiena i Sanitaria*. 2018. V. 97 No. 11. P. 1032–1037 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1032-37

13. Doorn J., Storteboom T.T.R., Mulder A.M., de Jong W.H.A., Rottier B.L., Kema I.P. Ion chromatography for the precise analysis of chloride and sodium in sweat for the diagnosis of cystic fibrosis // *Annals of clinical biochemistry*. 2015. V. 52. No. 4. P. 421–427. doi: 10.1177/0004563214549642

14. Munns R. Comparative physiology of salt and water stress // *Plant, Cell & Environment*. 2002. V. 25. No. 2. P. 239–250. doi: 10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x

15. Wilschefski S.C., Baxter M.R. Inductively coupled plasma mass spectrometry: introduction to analytical aspects // *The Clinical Biochemist Reviews*. 2019. V. 40. No. 3. P. 115–133. doi: 10.33176/AACB-19-00024

16. МР 2.1.7.2297–07 Justification of the phytotoxicity hazard class of industrial and consumer waste: Guidelines. Moskva: Federal'nyj centr gigeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2008. 15 p. (in Russian).

17. Voronina L.P., Ponogaybo K.E. Approach to the choice of phytotesting methods for soil research // *Агрохимия*. 2021. No. 9. P. 75–79 (in Russian). doi: 10.31857/S000218812109012X