Научная статья
УДК 631.4:581.1
DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-133-144
EDN: FZALIG

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ К ЗАСОЛЕНИЮ NACL

Анна Александровна Перевощикова[1, 2]✉, Наталья Васильевна Митракова[2], Тимофей Сергеевич Бачурин[2], Никита Алексеевич Кобелев[2]
[1] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия
[2] Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия
✉ aaperevoshchikova@yandex.ru

Аннотация. Проблема засоления почв остро стоит во всем мире, что приводит к выводу из хозяйственного оборота больших площадей земель. На территории Верхнекамского месторождения солей дерново-подзолистые почвы элювиальных ландшафтов подвержены засолению вследствие аварий, пыления солеотвалов и возникновения дренажей от объектов хранения отходов. В статье проводится оценка устойчивости дерново-подзолистой почвы к загрязнению хлоридно-натриевой солью. Основной метод исследования – фитотестирование. Рассмотрена ответная реакция высоты и массы двух тест-культур: кресс-салата и овса посевного, а также фотосинтетического аппарата овса. Результаты исследования показали достоверное снижение высоты и массы тест-культур в условиях добавления в почву NaCl, при этом чем выше доза загрязнения, тем ниже высота и масса относительно контрольных показателей. Для кресс-салата токсичность проявилась при дозе внесения NaCl выше 0,3 %, для овса – при 0,5 % и выше. Отмечено снижение кислотности почвы при повышении дозы внесения хлорида натрия. На содержание элементов питания (NPK) внесение NaCl в разных дозах достоверного воздействия не оказало. Засоление привело к повышению количества пигментов в овсе. Пороговая концентрация NaCl для дерново-подзолистой почвы составила 0,3 %. Результаты исследования могут помочь для разработки рекомендаций к установлению предельных допустимых концентраций при засолении почв.

Ключевые слова: засоление, хлорид натрия, почва, фитотестирование, фитотоксичность
Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00324.
Для цитирования: Перевощикова А. А., Митракова Н. В., Бачурин Т. С., Кобелев Н. А. Исследование устойчивости дерново-подзолистой почвы средней тайги к засолению NaCl // Географический вестник = Geographical bulletin. 2026. № 2(77). С. 133–144. EDN: FZALIG DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-133-144

Original article
DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-133-144
EDN: FZALIG

NACL SALINIZATION RESISTANCE OF SODDY-PODZOLIC SOIL IN THE MIDDLE TAIGA

Anna A. Perevoshchikova[1, 2] ✉, Natalya V. Mitrakova[2], Timofey S. Bachurin[2], Nikita A. Kobelev[2]
[1] Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
[2] Perm State University, Perm, Russia
✉ aaperevoshchikova@yandex.ru

Abstract. The problem of soil salinization is acute worldwide, this leading to the withdrawal of large areas of land from agricultural use. In the territory of the Verkhnekamskoe Potash Deposit, soddy-podzolic soils of eluvial landscapes are subject to salinization due to accidents, windblown dust from salt dumps, and drainage from waste storage facilities. The study assesses the resistance of soddy-podzolic soil to sodium chloride contamination using phytotoxicity testing. The height and biomass of two test species (garden cress and common oat) as well as the photosynthetic apparatus of oats were examined. The results showed a marked decrease in the height and biomass of the test species following the addition of NaCl to the soil. The higher the contamination dose, the lower the height and biomass relative to the control values. Toxicity was observed at NaCl doses above 0.3 % for garden cress and at 0.5 % and above – for oats. A decrease in soil acidity was noted with increasing the sodium chloride dose. The addition of NaCl at different doses had no substantial effect on nutrient (NPK) content. Salinization led to a higher pigment content in oats. The threshold NaCl concentration

© Перевощикова А. А., Митракова Н. В., Бачурин Т. С., Кобелев Н. А., 2026
Лицензировано под CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

for soddy-podzolic soil was found to be 0.3 %. These findings can inform the development of recommendations for establishing maximum permissible concentrations at soil salinization.

Keywords: salinization, sodium chloride, soil, phytotesting, phytotoxicity

Funding. The research was funded by a grant from the Russian Science Foundation, project No. 24-27-00324.

For citation: Perevoshchikova A. A., Mitrakova N. V., Bachurin T. S., Kobelev N. A. NaCl salinization resistance of soddy-podzolic soil in the middle taiga. *Geographical Bulletin*, 2026, no. 2(77), pp. 133–144. EDN: FZALIG DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-133-144

Введение

Засоление почвы представляет собой проблему для сельскохозяйственных, городских, и промышленных территорий. Согласно сведениям доклада ФАО (FAO – Food and Agriculture Organization), опубликованного в декабре 2024 г., почти 1,4 млрд га земли (чуть более 10 % от общей площади суши в мире) уже пострадало от засоления, а еще 1млрд га находится под угрозой. Основными причинами засоления являются изменение климата и некачественный менеджмент земельными ресурсами. Несмотря на то, что основная часть засоленных земель относится к сельскохозяйственным угодьям, площадь засоленных участков продолжает увеличиваться с каждым годом в связи с ростом добычи углеводородов, калийных солей, использования противогололедных средств.

По данным источника [22], к засоленным (Salt-affected soils) относятся почвы, в которых в любом из горизонтов почвенного профиля присутствуют легкорастворимые соли или их ионы в количествах, превышающих уровень токсичности – максимально допустимую концентрацию солей, не оказывающую негативного влияния на растения. Из-за засоления почв значительные площади земель становятся непригодными для ведения сельского хозяйства, также для таких земель характерно снижение биоразнообразия. Необратимые изменения приводят к снижению способности почв выполнять свои экологические функции, что, в свою очередь, вызывает деградацию экосистем. Для предприятий, занимающихся добычей и производством солей, характерно явление техногенного засоления, которое может происходить даже в условиях влажного климата [29; 33]. В частности, регионы Западной Сибири и Тюменской области подвержены этому явлению из-за воздействия минерализованных вод и других антропогенных факторов. В том числе процесс техногенного засоления почв наблюдается на территории Казахстана, где сосредоточено около 140 млн га земель, подверженных засолению, что связано с недостатком осадков и неправильным орошением.

В засоленных почвах наблюдается снижение потенциального плодородия, а также доступности макро- и микроэлементов для растений. При солевом стрессе в растениях угнетается синтез белков, а распад уже существующих белковых комплексов усиливается [10; 22; 30]. Это снижение синтеза белка проявляется в замедлении роста и развития растений, а также в нарушении их метаболических процессов. Увеличение уровня засоления нарушает гомеостатический водный баланс растений [22; 30]. Токсичными для растений при этом являются: хлориды (NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$), сульфаты (Na_2SO_4, $MgSO_4$), карбонаты (Na_2CO_3, $NaHCO_3$), нитраты ($NaNO_3$, KNO_3). Токсическое воздействие хлорид-ионов связано с их высокой подвижностью и способностью быстро проникать в корневые клетки растений, не задерживаясь в почвенном растворе [10; 30]. Существуют также данные о том, что на тканевом уровне хлор в основном накапливается в тканях с пониженными физиологическими функциями, в то время как в тканях, где происходят важные метаболические процессы, его содержание минимально. Например, у фасоли хлор скапливается в межклетниках ксилемы стебля. Он может также концентрироваться в верхней части и по краям листьев, что приводит к образованию некрозов [30].

Одним из наиболее токсичных для растений является натриево-хлоридное засоление (NaCl) [10; 29]. NaCl обеспечивает токсичный эффект при определенных дозах. Избыточное содержание ионов натрия и хлорид-ионов в почвенном растворе приводит к их успешной конкуренции с ионами K^+, Ca^{2+} и Mg^{2+} при поступлении в клетки растений, что вызывает метаболический стресс и, как следствие, угнетение роста, нарушение функционирования устьичного аппарата, а в конечном итоге гибель растения [40]. При загрязнении почвы хлоридом натрия значительно уменьшается скорость фильтрации воды, что, в свою очередь, снижает скорость вымывания хлорид-ионов из загрязненной почвы. Это связано с тем, что натрий негативно влияет на структуру почвы. Чем выше концентрация натрия, тем медленнее происходит удаление хлорид-ионов из почвы [21]. Следует заметить, что к низким уровням засоления растительное сообщество способно адаптироваться путем замены видового состава на солеустойчивые виды. При превышении некоторого порога растительное сообщество погибает. Главной проблемой является выявление допустимого содержания NaCl, концентрация которого не вызовет нарушений в жизнедеятельности высших растений.

Следует отметить, что в современное время в Российской Федерации отсутствуют нормативы по содержанию натрия и хлоридов в почвах [44]. При разработке нормативов допустимого содержания засоляющих веществ необходимо учитывать свойства почв. Так, более плодородные почвы обладают большей устойчивостью к более высоким дозам засоления. Исследование устойчивости растений к засолению проводят на модельных экспериментах на коротких и длительных временных интервалах [9] относительно разных типов почв. Однако накопленные данные часто являются разрозненными и несвязанными [11], в исследованиях часто не принимается во внимание, что засоление может сопровождаться ощелачиванием или закислением почвы [19].

Одним из путей решения проблемы устойчивости почвы к засолению является изучение влияния различных концентраций хлорида натрия на растения методом фитотестирования. Уровень накопления загрязнителей в природных, антропогенных, техногенных, сельскохозяйственных почвах традиционно определяется с использованием физико-химических и химических методов. Однако аналитические методы

контроля констатируют лишь сам факт загрязнения, но не дают информации о влиянии выявленного загрязнения на живые организмы [1]. Биотестирование является наиболее целесообразным методом определения интегральной токсичности почвы, в основе этого метода лежит определение реакции живых организмов на содержание загрязняющих веществ в субстрате [2; 4]. По мнению ряда исследователей, адекватную оценку токсичности почв и грунтов обеспечивает субстратное, или контактное, биотестирование [23; 24; 28]. Высшие растения служат важнейшими тест-культурами, поскольку являются основой трофических и энергетических отношений в биоценозе. Интегральным и наиболее важным показателем качества почв служит состояние и биомасса произрастающих на них растений [24]. Чувствительность растений к внешним воздействиям проявляется в изменении биохимических реакций и отражается в морфологических параметрах роста и развития. Метод актуален в модельных исследованиях по нормированию загрязняющих веществ [31], а также для выявления биоактивности различных химикатов и промышленных отходов [3; 16; 25; 32; 39]. Фитотестирование – это не только метод оценки токсичности почв, но и критерий устойчивости почв к загрязнению [12; 14; 26]. Чем слабее реакция тест-культуры на загрязнение, тем выше устойчивость почв к данному виду токсикантов. Почва, сохранившая на фоне загрязнения свои экологические функции по обеспечению роста и развития растений, будет более устойчивой, чем загрязненная почва, на которой растения заметно снизили биометрические показатели.

В Пермском крае расположено Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей (ВКМКС) – одно из крупнейших в мире. Месторождение комплексное: на его базе ведется добыча сильвинитов, карналлита, каменной соли. В зоне влияния отходов калийной промышленности зональные ландшафтно-геохимические условия нарушают процессы засоления: происходит засоление подземных и поверхностных вод, почв [29].

Основной причиной загрязнения в этом горнодобывающем районе является неконтролируемый сброс дренажных вод из солеотвалов и шламохранилищ. На территории Верхнекамского калийного месторождения накопилось более 270 млн т галитовых отходов и 30 млн м^3 глинисто-солевых шламов [43]. Галитовые отходы, содержащие более 90 % NaCl, обычно складируются, тогда как глинистые шламы и рассолы концентрируются в шламохранилищах. Основное негативное воздействие испытывают аллювиальные ландшафты и почвы долин малых рек [29]. Устойчивость почв элювиальных ландшафтов, а именно дерново-подзолистых почв не изучена в связи с отсутствием значительного воздействия на них. Однако аварии на производстве, например прорыв трубопроводов, пыление солеотвалов и накопление соленых дренажных вод, являются фактором воздействия на почвы элювиальных ландшафтов.

Цель исследования – оценка устойчивости дерново-подзолистой почвы территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей к хлоридно-натриевому засолению по ответной реакции тест-культур.

Материалы и методы исследования

Территория отбора почвы расположена вблизи муниципального округа г. Березники в южной части ВКМКС (рис. 1). Территория относится к Висимскому ландшафту, вид ландшафта – холмистые ледниково-эрозионные, часто с покровными суглинками на верхнепермских и мезозойских терригенных и терригенно-карбонатных породах [45]. Четвертичные породы – флювиогляциальные отложения, окатанные валуны, галечники, гравий, пески косо- и диагонально-слоистые. Дочетвертичные отложения представлены шешминской свитой, в составе аргиллиты красновато-коричневые, песчаники, участками медистые, прослои мергелей, известняков, гипса. Растительность представлена пихтово-еловыми травяно-кустарничковыми лесами. Почвы территории исследования относятся к Вятско-Камской провинции дерново-мелко- неглубоко- и глубокоподзолистых почв и дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом к Косинскому округу дерново-глубокоподзолистых глинистых и суглинистых почв на покровных отложениях.



Рис. 1. Контур Верхнекамского месторождения и ареал отбора почвы
Fig. 1. Verkhnekamskoe Deposit and soil sampling area

Объект исследования – дерново-подзолистая почва суглинистого гранулометрического состава, кислая, малоплодородная, содержание органического вещества около 2 %, низкая емкость катионного обмена.

Для фитотестирования использованы две тест-культуры: *Avena sativa* – овес посевной и *Lepidium sativum* – кресс-салат. Кресс-салат является двудольным растением, обладает быстрым ростом, высокой всхожестью и способностью реагировать на антропогенные факторы. Данная культура показала положительную реакцию на содержание гумуса и питательных веществ, насыщенность основаниями, отрицательную реакцию – на загрязнение тяжелыми металлами, кислую и щелочную реакцию, засоление [8; 18]. Овес посевной является однодольным растением и также характеризуется быстрым ростом, высокой всхожестью. Согласно ГОСТ Р ИСО 22030–2009, рекомендуются не менее двух тест-культур, относящихся к разным классам – однодольные и двудольные растения.

Период проведения эксперимента: 23 июля – 1 августа 2024 г., овес посевной, снятие растений на 10 день; 25 июля – 1 августа 2024 г., кресс-салат, снятие растений на 7 день. Методика эксперимента применена согласно [7]. Тест-реакцией послужили изменение морфометрических (высота, масса) параметров и содержание фотосинтетических пигментов. Тест-контроль – растения, выращенные на вермикулите с раствором Кнопа и на дерново-подзолистой почве, не подвергавшейся засолению. Исследованы следующие концентрации NaCl в г на 100 г почвы 0; 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2. Дозы засоления хлоридами натрия выбраны после изучения научной литературы по данной проблеме, а также свойств почв, таких как низкое содержание органического вещества и кислая реакция почвенного раствора.

Образцы почвы проанализированы на содержание общего азота, pH водной вытяжки, хлорид-ионов, натрия, подвижного фосфора и калия. Общий азот определяли по ГОСТ Р 58596–2019 титриметрическим методом анализа с разложением почвы, pH водной вытяжки определен по ГОСТ 26423–85 потенциометрическим методом на иономере рХ–150, содержание хлорид-ионов определено согласно ГОСТ 26425–85 аргентометрическим методом, содержание натрия – по ГОСТ Р 54650–2011 методом пламенной спектрофотометрии с использованием пламенного фотометра ПФА-378. Фосфор и калий подвижный определили по ГОСТ Р 54650–2011. Измерения фосфора проводились на спектрофотометре UNICO 2100 при длине волны 710 нм, определение калия осуществляли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре ПФА-378.

Количественное определение содержания пигментов в зеленых листьях растений (хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов) находили спектрофотометрическим методом. Для определения оптической плотности использовали экстракт растений с ацетоном (C_3H_6O) и мелом ($CaCO_3$). Оптическую плотность пигментов, полученную из растений, определяли при длинах волн: 665, 649, 440 нм, используя кюветы с толщиной поглощающего слоя 10 мм. Для вычисления оптической плотности пигментов использовали спектрофотометр UNICO 2100.

Программное обеспечение Past 4.03 использовалось для расчета статистических показателей. Для анализа полученных данных применяли регрессионный анализ с доверительной вероятностью 95 %. Образцы растений сравнивали с использованием t-test, количество ферментов – дисперсионным непараметрическим методом (критерий Крускала – Уоллиса). Значимые различия между сравниваемыми средними значениями считались с уровнем достоверности 95 % и выше ($P < 0,05$).

Результаты и их обсуждение

Результаты морфометрических параметров. *Кресс-салат.* На первые сутки после посадки кресс-салата при засолении 0,05 г/100 г NaCl отмечается хорошее прорастание семян; в концентрации 0,1 г/100 г NaCl отмечается набухание и вскрытие семян; в концентрации 0,3 г/100 г NaCl отмечается набухание семян. На почве, засоленной NaCl в концентрациях 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 2,0 г/100 г, отсутствуют всходы. На 7 сутки при засолении NaCl 0,5; 0,7; 1,0; 1,5; 2,0 г/100 г растения не выросли, данные концентрации NaCl с совместным действием свойств почвы оказались токсичными для кресс-салата.

Статистический анализ показал достоверное снижение высоты и массы тест-культуры, выращенной на почве с засолением 0,05 и 0,3 г/100 г NaCl, от высоты и массы растений кресс-салата, выращенных на вермикулите (табл. 1). Средние значения высоты и массы растений на вермикулите – 38 мм и 19 мг соответственно, что на 42 и 26 % выше, чем высота и масса растений, выращенных на дерново-подзолистой почве с засолением 0,05 г/100 г; снижение высоты и массы растений на почве с концентрацией 0,3 г/100 г составило 58 и 26 % соответственно (табл. 1). Согласно критериям, описанным в патенте по оценке экологического состояния почв [7], снижение высоты и массы на более чем 50 % следует считать экологически опасным.

Эксперимент по оценке засоления зональных дерново-подзолистых почв NaCl показал, что при засолении почв в концентрации от 0,5 г/100 г отсутствуют всходы растений; при концентрациях 0,1 и 0,3 г/100 г семена проросли, но количество всходов значительно ниже контроля на вермикулите. На контрольной почве без засоления растения не показали достоверного снижения высоты и массы в сравнении с растениями на вермикулите.

Засоление почвы NaCl в концентрации 0,05 г/100 г показало достоверное снижение высоты и массы растений на 41 и 26 % соответственно от массы растений, выращенных на контрольной почве (рис. 1, 2). Засоление почвы NaCl в концентрации 0,3 г/100 г привело к снижению высоты и массы относительно контроля на незасоленной почве на 57 и 26 % соответственно.

Таблица 1
Table 1

Высота и масса *Lepidium sativum*, выращенного на дерново-подзолистой почве
Height and mass of *Lepidium sativum* grown on soddy-podzolic soil

Показатель	*Контроль вермикулит*		*Контроль почва*		*NaCl 0,05*		*NaCl 0,3*	
	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг
Среднее	38	19	37	19	22*	14*	16*	14*
Ошибка	1,9	0,9	1,8	0,9	1,1	0,7	0,8	0,7
Минимум	22	13	25	15	13	7	11	10
Максимум	50	25	47	22	34	18	23	16
Стандартное отклонение	7	3	5	2	6	1	3	2

Примечание: * – достоверные отличия от контроля на вермикулите.
Note: * – significant differences from the control on vermiculite.

Овес посевной. На вторые сутки после посадки овса при засолении NaCl в дозах 0,05; 0,1; 0,3 г/100 г отмечается хорошее прорастание семян; в концентрации NaCl 0,5 г/100 г отмечается набухание и вскрытие семян. На почве, засоленной NaCl в концентрациях 0,7; 1,0; 1,5; 2,0 г/100 г отсутствуют всходы. При засолении NaCl 0,7; 1,0; 1,5; 2,0 г/100 г растения не выросли, данные концентрации NaCl с совместным действием почвенных свойств оказались токсичными для овса (табл. 2).

Статистический анализ показал достоверное снижение высоты и массы тест-культуры, выращенной на контрольной почве и с засолением NaCl 0,05; 0,1; 0,3; 0,5 г/100 г, от высоты и массы растений, выращенных на вермикулите. Высота и масса растений на вермикулите – 170 мм и 130 мг соответственно, что на 10 и 25 % выше, чем высота и масса растений, выращенных на дерново-подзолистой почве с засолением NaCl 0,05 г/100 г; снижение высоты и массы растений на почве с концентрацией NaCl 0,1 г/100 г составило 12 и 28 % соответственно; с концентрацией NaCl 0,3 г/100 г – 29 и 54 % соответственно; с концентрацией NaCl 0,5 г/100 г – 79 и 81 % соответственно (табл. 2). Согласно критериям, описанным в патенте по оценке экологического состояния [7], снижение высоты и массы более чем на 30 % свидетельствует о неудовлетворительном состоянии почвы, а снижение этих показателей более чем на 50 % считают экологически опасным.

Таблица 2
Table 2

Высота и масса *Avena sativa*, выращенного на дерново-подзолистой почве
Height and mass of *Avena sativa* grown on soddy-podzolic soil

Показатель	*Контроль вермикулит*		*Контроль почва*		*NaCl 0,05*		*NaCl 0,1*		*NaCl 0,3*		*NaCl 0,5*	
	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг	Высота, мм	Масса, мг
Среднее	170	130	153	97*	153*	98*	149*	94*	120*	60*	35*	25*
Ошибка	8,5	6,5	7,6	4,8	7,6	4,9	7,4	4,7	6,0	3,0	1,7	1,2
Минимум	74	8	133	76	95	47	87	49	74	33	15	15
Максимум	21	207	170	120	184	141	195	155	144	92	54	33
Стандартное отклонение	9	54	11	14	5	24	8	8	20	16	12	6

Примечание: * – достоверные отличия от контроля на вермикулите.
Note: * – significant differences from the control on vermiculite.

Эксперимент по оценке засоления NaCl дерново-подзолистых почв показал, что при засолении почв в концентрации от 0,7 г/100 г отсутствуют всходы растений; при концентрациях 0,1 и 0,3 г/100 г растения выросли, но значительно ниже контроля на вермикулите. На контрольной почве без засоления растения показали достоверное снижение высоты и массы по сравнению с растениями на вермикулите, что может быть связано с природными свойствами почв – кислой реакцией и низким плодородием, что также свидетельствует о низкой устойчивости к засолению.

В исследовании [13] рассматривалось содержание активных форм кислорода в листьях овса посевного, выращиваемого в различных условиях засоления и pH корневой среды. Результаты показали, что засоление в сочетании с различными уровнями pH приводит к замедлению роста растений. С увеличением концентрации NaCl в субстрате наблюдалось повышение содержания хлорид-ионов и ионов натрия в листьях овса. В работе [17]

отмечается, что солевое загрязнение NaCl негативно сказывается на овсе посевном при концентрации 2,5 г/л. Исследование [36] демонстрирует, что поглощение ионов Na^+, K^+ и Cl^- овсом посевным зависит от сорта, стадии роста и органа растения.

Результаты биохимических параметров

Исследование пигментов выполнено для овса посевного. Неблагоприятные условия среды, такие как низкие температуры, засуха, засоление и др., оказывают существенное влияние на фотосинтетический аппарат растений. В овсе, выращенном на почвах с разными дозами внесения NaCl, определяли содержание хлорофиллов и каротиноидов (рис. 2). Наибольшее содержание фотосинтетических пигментов (*a, b* и каротиноиды) обнаружено у растений, выращенных на варианте с дозой NaCl 0,3 г/100 г. Наименьшее содержание хлорофилла *a* отмечено на контроле с вермикулитом, хлорофилла *b* – на контроле с вермикулитом и почвой и на варианте NaCl 0,5 г/100 г, каротиноидов – на варианте NaCl 0,1 г/100 г (рис. 2).

Содержание фотосинтетических пигментов на различных вариантах опыта выше или равно содержанию в контрольных образцах. Судя по всему, овес посевной, адаптируясь к стрессовым условиям засоления, демонстрирует неоднозначные изменения в содержании фотосинтетических пигментов, что, вероятно, связано с уровнем влаги и временем проведения эксперимента.

Под воздействием ионов, вызывающих засоление, происходит замедление синтеза белков и нуклеиновых кислот, что приводит к снижению темпов роста и уменьшению биомассы. Замедление роста листьев является защитной реакцией на нехватку воды, поскольку уменьшение площади листовой поверхности помогает растениям сократить потери воды за счет снижения транспирации. Изучение состояния пигментного аппарата имеет ключевое значение для понимания механизмов адаптации растений к стрессовым факторам [6].

Так, изменение корневой среды, а именно ощелачивание корневой среды в кислых почвах привело к увеличению количества хлорофиллов *a* и *b* [6]. Это особенно заметно в отношении хлорофилла a. Увеличение биосинтеза хлорофилла a, вероятно, является одной из адаптивных реакций растений на засоление и ощелачивание корневой среды.

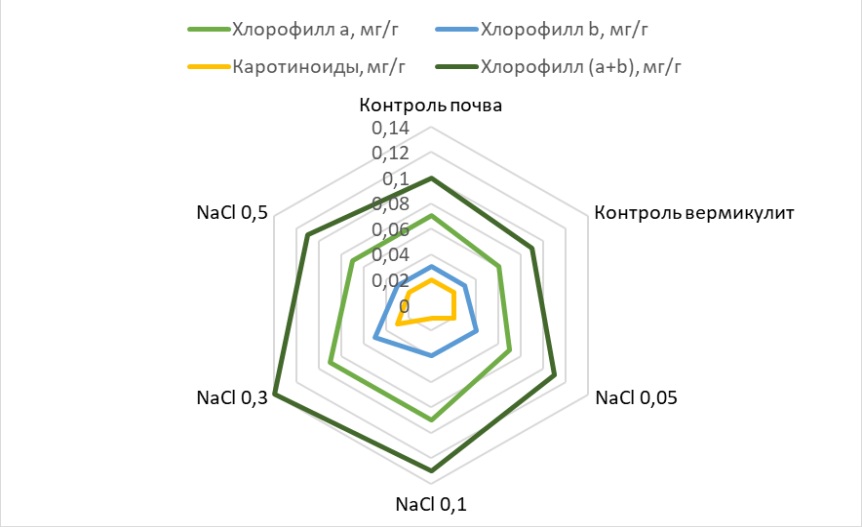


Рис. 2. Количественное содержание пигментов фотосинтеза в побегах *Avena sativa*
Fig. 2. Quantitative content of photosynthetic pigments in *Avena sativa* shoots

Химические параметры почв

Экспериментальное изучение дозозависимого эффекта хлорида натрия на почвенные свойства выявило значительные изменения химических параметров почв и их потенциальное влияние на тест-культуры. Концентрации Cl^- и Na^+ в 18 пробах показали сильную положительную корреляцию (r = 0,998), варьируясь от 0,10 до 33,93 ммоль/100 г для Cl^- и от 0,07 до 34,25 ммоль/100 г для Na^+, что отражает последовательное увеличение засоления в зависимости от внесенной дозы NaCl (табл. 3).

Сильная отрицательная корреляция между pH и содержанием Cl^- (r = –0,85) и Na^+ (r = –0,84) указывает на уменьшение кислотности почвы с ростом засоления. При воздействии засоленных вод на кислые аллювиальные почвы снижается кислотность [44]. Содержание общего азота оставалось относительно стабильным (0,117–0,138 %) и не демонстрировало значимой корреляции с Cl^- и Na^+, что указывает на устойчивость содержания в почвах азота к засолению в условиях проведенного эксперимента. Содержание фосфора и калия в почвенных пробах демонстрирует устойчивость к воздействию NaCl. Концентрация P_2O_5 варьировалась от 83 до 120 мг/кг (среднее 95,6 мг/кг), K_2O изменялся в более широком диапазоне – от 93 до 265 мг/кг (среднее 211,2 мг/кг) (табл. 1). Корреляционный анализ не выявил зависимости между P_2O_5 и Cl^- (r = 0,15) или Na^+ (r = 0,14), что указывает на стабильность фосфора в почве при увеличении уровня засоления. Стабильность сохраняется даже при высоких дозах NaCl, что может смягчить эффект засоления. Содержание показало слабую отрицательную

корреляцию (r = –0,30 в обоих случаях) с Cl^- и Na^+. Максимальные значения обоих параметров достигаются в пробе с кресс-салатом NaCl 0,1 г/100 г, а в пробах с овсом значения K_2O были ниже при минимальных дозах NaCl. Эти различия могут влиять на физиологические особенности растений.

Обе тест-культуры показывают схожие тенденции в химических параметрах почв. Однако при максимальной дозе NaCl содержание Cl^- и Na^+ в пробах с овсом (31,77 и 32,50 ммоль/100 г) было ниже, чем с кресс-салатом (33,93 и 34,25 ммоль/100 г) (табл. 1), что может указывать на более высокую способность овса поглощать соли из почв. Полученные данные свидетельствуют о том, что NaCl оказывает дозозависимое влияние на кислотность почв.

В отличие от исследований, направленных на изучение влияния тяжелых металлов на свойства почв [5; 20] или загрязнения нефтепродуктами [27; 41; 42], данное исследование обращено к изучению контролируемого засоления почвы NaCl. Аналогичные исследования [27; 42] подчеркивают высокую чувствительность кресс-салата к большому количеству токсичных веществ, что делает эту культуру более подходящей для оценки токсичности NaCl. Пробы с овсом дополняют анализ благодаря устойчивости этой культуры, что подтверждают работы [5; 38]. Полученные результаты также подтверждают выводы [37] о том, что фитотестирование на почвах точнее, чем на водных вытяжках, так как корни растений взаимодействуют с полным спектром почвенных компонентов.

Таблица 3
Table 3

Свойства исследуемых почв
Properties of the studied soils

Проба	*Общий азот, %*	*pH_{H2O}*	*Cl, ммоль/100г*	*Na, ммоль/100г*	*P_2O_5, мг/кг*	*K_2O, мг/кг*
Контроль почва кресс-салат	0,135	5,0	0,20	0,13	101	255
Контроль почва овес	0,128	4,8	0,10	0,07	83	105
Почва овес NaCl 0,05	0,117	5,0	0,34	0,3	87	110
Почва кресс-салат NaCl 0,05	0,137	4,9	1,47	0,81	101	255
Почва овес NaCl 0,1	0,128	4,8	1,57	1,14	88	93
Почва кресс-салат NaCl 0,1	0,138	4,7	16,57	14,7	120	265
Почва овес NaCl 0,3	0,12	4,5	4,31	3,52	87	120
Почва кресс-салат NaCl 0,3	0,13	4,6	5,29	4,15	95	247
Почва овес NaCl 0,5	0,127	4,5	7,50	6,13	86	177
Почва кресс-салат NaCl 0,5	0,134	4,5	8,82	7,27	83	240
Почва овес NaCl 0,7	0,124	4,6	10,69	9,85	97	223
Почва кресс-салат NaCl 0,7	0,137	4,5	11,96	11,10	96	259
Почва овес NaCl 1	0,133	4,5	16,47	16,00	100	230
Почва кресс-салат NaCl 1	0,129	4,4	17,21	16,40	93	245
Почва овес NaCl 1,5	0,126	4,4	23,53	23,50	102	220
Почва кресс-салат NaCl 1,5	0,129	4,5	24,32	24,50	108	253
Почва овес NaCl 2	0,122	4,4	31,77	32,50	100	210
Почва кресс-салат NaCl 2	0,131	4,4	33,93	34,25	103	255

Результаты эксперимента показали, что дерново-подзолистая почва в связи с кислой реакцией и низким плодородием является малоустойчивой к засолению. Собственно почвенные свойства не позволяют справиться с хлоридно-натриевым засолением с дозой более чем 0,5 %. Для предотвращения негативного воздействия на почвы и растительный покров близ мест складирования отходов недропользователям необходимо осуществлять мониторинг состояния почвенного покрова и принимать профилактические меры.

Заключение

В последнее десятилетие все более актуальным является изучение влияния техногенного засоления, связанного с добычей и производством солей, алмазов, нефти, в том числе и с применением антигололедных средств на урбанизированных территориях. С помощью метода фитотестирования было проведено исследование по выявлению ответной реакции тест-культур на загрязнение почв исключительно NaCl в различных дозах на дерново-подзолистой почве. Повышение концентрации NaCl с 0,5 % и выше сопровождается выраженной токсичностью (более 50 %) для овса посевного и с 0,3 % и выше для кресс-салата. На фоне кислой дерново-подзолистой почвы с комбинированным действием NaCl от 0,3 и выше почвы можно отнести к категории токсичных с опасным экологическим состоянием, о чем свидетельствуют морфометрические данные о высоте и массе исследуемых тест-культур.

Содержание фотосинтетических пигментов в овсе посевном в различных вариантах опыта выше или равно содержанию в контрольных образцах. По-видимому, овес посевной, в условиях адаптации к существованию в стрессовых условиях засоления, реагирует изменением содержания фотосинтетических пигментов

неоднозначно, предположительно, также сказывается и обеспеченность влагой. Согласно химическим показателям в исследуемых почвах, отмечено, что засоление NaCl оказывает дозозависимое влияние на кислотность почв.

Таким образом, пороговая концентрация для дерново-подзолистой почвы при засолении NaCl составила 0,3 %, при засолении выше этой концентрации создаются токсичные условия, в которых растения не способны развиваться. Установлено отсутствие негативного действия NaCl на рост и развитие овса посевного в диапазоне концентраций от 0,05 до 0,1 %, так как однодольные растения более устойчивы к загрязнению почв (в частности, к засолению). Данные концентрации не оказывают отрицательного влияния на показатели фитотоксичности, и почва может относиться к категории «практически нетоксичных» для растений.

Результаты работы могут применятся для разработки рекомендаций для недропользователей с целью обеспечения устойчивого ведения хозяйства.

Библиографический список

1. *Багдасарян А. С.* Биотестирование почв техногенных зон городских территорий с использованием растительных организмов: автореф. дис. … канд. биол. наук / Ставропольский государственный университет. Ставрополь, 2005. 24 с. EDN: NIIOGZ

2. *Бардина Т. В., Чугунова М. В., Бардина В. И.* Изучение экотоксичности урбаноземов методами биотестирования // Живые и биокосные системы. 2013. № 5. С. 8. EDN: UYNDMR

3. *Бардина Т. В., Чугунова М. В., Бардина В. И.* Изучение токсичности почвенного покрова в зоне длительного влияния отходов производства серной кислоты контактными методами биотестирования // Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии: мат. междунар. симпозиума и школы. М.: ГЕОС, 2016. С. 10–15.

4. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестировнаие: учеб. пособие для студ. ВУЗов / под ред. О. П. Мелеховой и Е. И. Сарапульцевой. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 228 с.

5. *Воронина Л. П., Поногайбо К. Э., Абрамов Е. Г., Кирьякова Н. А., Савостикова О. Н.* К нормированию кадмия в почве по его воздействию на растения // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102, № 11. С. 1154–1162. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1154-1162 EDN: RRXPMX

6. *Еремченко О. З., Кусакина М. Г., Лузина Е. В.* Содержание пигментов в растениях Lepidium sativum в условиях хлоридно-натриевого засоления и ощелачивания // Вестник ПГУ. 2014. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-pigmentov-v-rasteniyah-lepidium-sativum-v-usloviyah-hloridno-natrievogo-zasoleniya-i-oschelachivaniya (дата обращения: 16.04.2025)

7. *Еремченко О. З., Митракова Н. В.* Способ оценки биологической активности и токсичности почв и техногенных почвогрунтов. Патент РФ № 2620555. 2016.

8. *Еремченко О. З., Шестаков И. Е., Паршакова Я. А.* Повышение редокс-активности растений как тест-реакция на загрязнение почв // Вестник Тамбовского университета. 2014. Т. 19, № 5. С. 1285–1288. EDN: SMOAGT

9. *Жуков Н. Н., Бойкова О. И., Иванищев В. В.* Физиолого-биохимические механизмы адаптации проростков тритикале при кратковременном NaCl-засолении (научная монография). Тбилиси: МП «Полиграф», 2016. 125 с.

10. *Иваничев В. В.* О механизмах солеустойчивости растений и специфике влияния засоления // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2019. Вып. 4. С. 76–88. EDN: LKLHPQ

11. *Иванищев В. В., Евграшкина Т. Н., Бойкова О. И., Жуков Н. Н.* Засоление почвы и его влияние на растения // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2020. Вып. 3. С. 28–42. EDN: BSJTXM

12. *Колесников С. И., Азнаурьян Д. К., Казеев К. Ш., Вальков В. Ф.* Устойчивость биологических свойств почв юга России к нефтяному загрязнению // Экология. 2010. № 5. С. 357–364. EDN: MVSLCF

13. *Кривощекова К. Э., Четина О. А.* Содержание активных форм кислорода в листьях овса посевного (Avena sativa) при выращивании в разных условиях засоления и pH корневой среды // Фундаментальные и прикладные исследования в биологии и экологии : мат. регион. студ. науч. конф. с междунар. участием (Пермь, 18–20 апреля 2018 г.). Пермь, 2018. С. 69–72. EDN: YQGHUD

14. *Кузина А. А., Колесников С. И., Казеев К. Ш., Акименко Ю. В.* Влияние загрязнения тяжелыми металлами и нефтью на фитотоксичность почв черноморского побережья Кавказа // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2016. № 2. С. 68–71. EDN: WBXESB

15. *Кузина Е. В., Рафикова Г. Ф., Мухаматдьярова С. Р., Шарипова Ю. Ю., Коршунова Т. Ю.* Биологическая активность чернозема выщелоченного при нефтяном и хлоридно-натриевом загрязнении и влияние на нее обработки галотолерантными бактериями-нефтедеструкторами // Почвоведение. 2023. № 1. С. 89–101. DOI: 10.31857/S0032180X22600718 EDN: JKECKN

16. *Кузнецов А. Е., Трутаева Н. Н., Проценко Е. П., Прусаченко А. В., Проценко А. А.* Проблемы фитотестирования малоопасных отходов сахарного производства // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2012. № 6. С. 53–56. EDN: ROBRQT

17. *Менделева В. П., Волкова И. В.* Влияние хлоридного загрязнения на морфометрические показатели овса посевного (Avena sativa) // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития: сборник науч. труд. по мат. междунар. науч. экол. конф. (Краснодар, 24–26 марта 2020 г.). Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, 2020. С. 198–200. EDN: ZLKVDF

18. *Митракова Н. В., Шестаков И. Е.* Исследование устойчивости темно-серых почв Пермского края методом биотестирования при загрязнении почв тяжелыми металлами // Антропогенная трансформация природной среды. 2015. № 1. С. 143–147. EDN: UNJJBH

19. *Мурсалимова Г. Р., Акбулякова Г. М.* Изменение физиологобиохимических показателей овса посевного при воздействии NaCl засоления и кислотности корневой среды // Фундаментальные и прикладные исследования в биологии и экологии: мат. регион. студ. науч. конф. с междунар. участием (Пермь, 19–25 апреля 2017 г.). Пермь, 2017. С. 65–67.

20. *Неверова О. А.* Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. 2009. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-fitoindikatsii-v-otsenke-zagryazneniya-okruzhayuschey-sredy (дата обращения: 23.04.2025) EDN: QZOGCV

21. *Петров В. Г., Ханнанов Д. А., Балицкий Я. А.* Подвижность хлорид-ионов в дерново-подзолистой почве при загрязнении хлоридами щелочных металлов // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21, № 2. С. 290–295. DOI: 10.15350/17270529.2019.2.31 EDN: COMHRV

22. Руководство по управлению засоленными почвами / под ред. Р. Варгаса, Е. И. Панковой, С. А. Балюка, П. В. Красильникова, Г. М. Хасанхановой. М.: Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций МГУ, 2017. 153 с.

23. *Селивановская С. Ю., Галицкая П. Ю.* Оценка токсичности почв с использованием контактного метода биотестирования // Токсикологический вестник. 2006. № 4. С. 12–15. EDN: HVBAOL

24. *Терехова В. А.* Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198. EDN: NDJDRT

25. *Терехова В. А., Гладкова М. М.* Инженерные наноматериалы в почве: проблемы оценки их воздействия на живые организмы // Почвоведение. 2014. № 1. С. 82–90. DOI: 10.7868/S0032180X14010122 EDN: RSIYAH

26. *Тимофеев М. А., Терехова В. А., Кожевин П. А.* Биотестирование почв при загрязнении кадмием // Вестник Московского ун-та. 2010. № 4. С. 44–47. EDN: OFXJVH

27. *Тишин А. С.* Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. Вып. 102, № 12. С. 78–83. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fitotestirovanie-pochv-zagryaznennyh-nefteproduktami (дата обращения: 23.04.2025) DOI: 10.23670/IRJ.2020.102.12.048 EDN: OVKKFH

28. *Фомин Г. С., Фомин А. Г.* Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. М.: «Протектор», 2001. 304 с.

29. *Хайрулина Е. А., Новоселова Л. В., Порошина Н. В.* Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Географический вестник = Geographical bulletin. 2017. № 1(40). С. 93–101. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-93-101 EDN: YNBUUB

30. *Чудинова Л. А., Орлова Н. В.* Физиология устойчивости растений: учеб. пособие. Пермь: Пермский ун-т, 2006. 124 с. ISBN: 5-7944-0653-4 EDN: QKPOXL

31. *Шагидуллин Р. Р., Латыпова В. З., Иванов Д. В., Шагидуллина Р. А., Тарасов О. Ю., Петров А. М.* Нормирование допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах // Георесурсы. 2011. Вып. 41, № 5. С. 2–5. EDN: OMUFOT

32. *Chaignon V., Hinsinger P. A.* Biotest for Evaluating Copper Bioavailability to Plants in a Contaminated Soil // Journal of Environmental Quality. 2003. Vol. 32, No. 3. P. 824–833. DOI: 10.2134/jeq2003.8240 EDN: YJFZFR

33. Environmental Aspects of Phosphate and Potash Mining. First edition. Paris: United Nations Publication. 2001. 62 p.

34. *Fuleky G., Barna S.* Biotesting of heavy metal pollution in the soil // Carpthian Journal of Earth and Environmental Sciences. 2008. Vol. 3, No. 2. P. 93–102.

35. *Gerasimova L., Eremina I., Kuklina A.* Assessment of chemical soil pollution by biotesting // The Scientific Heritage. 2020. No. 45–2(45). P. 17–20. EDN: NHHUCS

36. *Han L. P., Wang W. H., Eneji A. E., Liu J.* Phytoremediating coastal saline soils with oats: accumulation and distribution of sodium, potassium, and chloride ions in plant organs // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 90. P. 73–81. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.064

37. *Krasavtseva E. A., Maksimova V. V.* Application of the phytotesting method to assess the environmental impact of the waste of Lovozersky GOK LLC // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. Vol. 548, No. 6. P. 62–69. DOI: 10.1088/1755-1315/548/6/062063 EDN: TXFJYK

38. *Modina M., Heckert E., Shkoda V., Kuznetsova J.* Biotesting in the assessment of vineyard soil toxicity // Agriculture and Food Security: technologies, innovations, Markets, human resources: BIO Web Conf.: International Scientific and Practical Conference (April 17th, 2024). DOI: 10.1051/bioconf/202410300054 EDN: UNXFZR

39. *Rosa E. V. C., Giuradelli T. M., Correa A. X. R., Rörig L. R., Schwingel P. R., Resgalla Jr. C., Radetski C. M.* Ecotoxicological evaluation of the short-term effects of fresh and stabilized textile sludges before application in forest soil restoration // Environmental Pollution. 2007. Vol. 146, No. 2. P. 463–469. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.07.005

40. *Seemann J. R., Critchley C.* Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, Phaseolus vulgaris L. // Planta. 1985. Vol. 164, No. 2. P. 151–162. DOI: 10.1007/bf00396077 EDN: MZGNBZ

41. *Vasilyeva G. K., Kondrashina V. S., Strijakova E. R, Pinsky D. L.* Express-phytotest for choosing conditions and following process of soil remediation // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 44, No. 2. P. 433–445. DOI: 10.1007/s10653-020-00727-8 EDN: OLKYHO

42. *Wieczorek D., Kwapisz E., Marchut-Mikołajczyk O., Bielecki S.* Phytotests as tools for monitoring the bioremediation process of soil contaminated with diesel oil // BioTechnologia. 2012. Vol. 93, No. 4. P. 431–439.

References

1. Bagdasaryan A. S. *Biotestirovanie pochv tekhnogennykh zon gorodskikh territorii s ispol'zovaniem rastitel'nykh organizmov* [Biotesting of soils of technogenic zones of urban territories using plant organisms]: Extended abstract of Cand.Sc. dissertation. Stavropol State University. Stavropol, 2005. 24 p. (In Russ.)

2. Bardina T. V., Chugunova M. V., Bardina V. I. Izuchenie ekotoksichnosti urbanozemov metodami biotestirovaniya [Study of ecotoxicity of urbanozems by biotesting methods]. *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2013, no. 5, p. 8. (In Russ.)

3. Bardina T. V., Chugunova M. V., Bardina V. I. Issledovanie toksichnosti pochvennogo pokrova v zone dlitel'nogo vliyaniya othodov proizvodstva sernoi kisloty kontaktnymi metodami biotestirovaniya [Study of soil cover toxicity in the zone of long-term influence of sulfuric acid production waste by contact biotesting methods]. In *Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma "Biodiagnostika i otsenka kachestva prirodnoi sredy"* [Materials of the international symposium "Biodiagnostics and assessment of the quality of the natural environment"]. Moscow: GEOS, 2016, pp. 10–15. (In Russ.)

4. *Biologicheskii kontrol' okruzhayushchei sredy: bioindikatsiya i biotestirovanie* [Biological control of the environment: bioindication and biotesting]. Ed. by O. P. Melekhova, E. I. Sarapultseva. Moscow: Izdatel'skii tsentr “Akademiya”, 2008. 228 p. (In Russ.)

5. Voronina L. P., Ponogaibo K. E., Abramov E. G., Kiryakova N. A., Savostikova O. N. On normalization of cadmium content in soil by its effect on plants. *Gigiena i sanitariya*, 2023, vol. 102, no. 11, pp. 1154–1162. (In Russ.) DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-11-1154-1162.

6. Eremchenko O. Z., Kusakina M. G., Luzina E. V. Soderzhanie pigmentov v rasteniyakh *Lepidium sativum* v usloviyakh khloridno-natrievogo zasoleniya i oshchelachivaniya [Pigment content in *Lepidium sativum* plants under conditions of sodium chloride salinization and alkalinization]. *Vestnik Permskogo universiteta*, 2014, no. 1. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/soderzhanie-pigmentov-v-rasteniyah-lepidium-sativum-v-usloviyah-hloridno-natrievogo-zasoleniya-i-oschelachivaniya (Accessed 16 April 2025).

7. Eremchenko O. Z., Mitrakova N. V. *Sposob otsenki biologicheskoi aktivnosti i toksichnosti pochv i tekhnogennykh gruntov* [A method for assessing the biological activity and toxicity of soils and man-made soils]. Patent RF no. 2620555. 2016. (In Russ.)

8. Eremchenko O. Z., Shestakov I. E., Parshakova Ya. A. Povyshenie okislitel'no-vosstanovitel'noi aktivnosti rastenii kak test-reaktsiya na zagryaznenie pochvy [Increased redox activity of plants as a test reaction to soil pollution]. *Vestnik Tambovskogo universiteta*, 2014, vol. 19, no. 5, pp. 1285–1288. (In Russ.)

9. Zhukov N. N., Boikova O. I., Ivanishchev V. V. *Fiziologo-biokhimicheskie mekhanizmy adaptatsii prorostkov tritikale pri kratkovremennom NaCl-zasolenii* [Physiological and biochemical mechanisms of adaptation of triticale seedlings during short-term NaCl salination]. Tbilisi: MP “Poligraf”, 2016. 125 p. (In Russ.)

10. Ivanichev V. V. O mekhanizmakh solestoikosti rastenii i spetsifike vliyaniya zasaleniya [On the mechanisms of salt resistance of plants and the specifics of the influence of salinization]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*, 2019, no. 4, pp. 76–88. (In Russ.)

11. Ivanishchev V. V., Evgrashkina T. N., Boikova O. I., Zhukov N. N. Zasolenie pochv i ego vozdeistvie na rasteniya [Soil salinization and its effect on plants]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2020, no. 3, pp. 28–42. (In Russ.)

12. Kolesnikov S. I., Aznauryan D. K., Kazeev K. Sh., Valkov V. F. Ustoychivost' biologicheskikh svoistv pochv yuga Rossii k neftyanomu zagryazneniyu [Stability of biological properties of soils of the south of Russia to oil pollution]. *Ekologiya*, 2010, no. 5, pp. 357–364. (In Russ.)

13. Krivoshchekova K. E., Chetina O. A. Soderzhanie aktivnykh form kisloroda v list'yakh ovsa (*Avena sativa*) pri vyrashchivanii v razlichnykh usloviyakh zasoleniya i pH kornevoi sredy [The content of reactive oxygen species in the leaves of oats (*Avena sativa*) when grown under different conditions of salinity and pH of the root medium]. In *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v biologii i ekologii: materialy region. studencheskoi nauch. konf. s mezhdunar. Uchastiem. Perm', 18–20 aprelya 2018 g.* Perm, 2018, pp. 69–72. (In Russ.)

14. Kuzina A. A., Kolesnikov S. I., Kazeev K. Sh., Akimenko Yu. V. Vliyanie zagryazneniya tyazhelymi metallami i neft'yu na fitotoksichnost' pochv Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza [Influence of heavy metal and oil pollution on phytotoxicity of soils of the Black Sea coast of the Caucasus]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region*, 2016, no. 2, pp. 68–71. (In Russ.)

15. Kuzina E. V., Rafikova G. F., Mukhamat'yarova S. R., Sharipova Yu. Yu., Korshunova T. Yu. Biologicheskaya aktivnost' chernozema vyshchelochennogo pri neftyanom i khloridno-natrievom zagryaznenii i vliyanie na nee obrabotki galotolerantnymi bakteriyami-neftedestruktorami [Biological activity of leached chernozem under oil and chloride-sodium pollution and the effect of treatment with halotolerant oil-destructing bacteria on it]. *Pochvovedenie*, 2023, no. 1, pp. 89–101. (In Russ.)

16. Kuznetsov A. E., Trutaeva N. N., Protsenko E. P., Prusachenko A. V., Protsenko A. A. Problemy fitotestirovaniya othodov sakharoproizvodstva malogo riska [Problems of phytotesting of low-hazard sugar production waste]. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2012, no. 6, pp. 53–56. (In Russ.)

17. Mendeleva V. P., Volkova I. V. Vliyanie khloridnogo zagryazneniya na morfometricheskie parametry ovsa (*Avena sativa*) [The influence of chloride pollution on the morphometric parameters of oats (*Avena sativa*)]. In *Agrarnye landshafty, ikh ustoichivost' i osobennosti razvitiya* : Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchnoi ekologicheskoi konferentsii, Krasnodar, 24–26 marta 2020 g. Krasnodar: Kubanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni I. T. Trubilina, 2020, pp. 198–200. (In Russ.)

18. Mitrakova N. V., Shestakov I. E. Issledovanie ustoichivosti temno-serykh pochv Permskogo kraya metodom biotestirovaniya pri zagryaznenii pochvy tyazhelymi metallami [Study of the stability of dark gray soils of the Perm region by biotesting during soil contamination with heavy metals]. *Antropogennaya transformatsiya prirodnoi sredy*, 2015, no. 1, pp. 143–147. (In Russ.)

19. Mursalimova G. R., Akbulyakova G. M. Izmeneniya fiziologo-biokhimicheskikh parametrov ovsa pod vliyaniem zasoleniya NaCl i kislotnosti kornevoi sredy [Changes in the physiological and biochemical parameters of oats under the influence of NaCl salinity and acidity of the root medium]. In *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v biologii i ekologii: materialy region. studencheskoi nauch. konf. s mezhdunar. Uchastiem. Perm', 19–25 aprelya 2017 g.* Perm, 2017, pp. 65–67. (In Russ.)

20. Neverova O. A. Primenenie fitoindikatsii v otsenke zagryazneniya okruzhayushchei sredy [Application of phytoindication in environmental pollution assessment]. *Biosfera*, 2009, no. 1. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-fitoindikatsii-v-otsenke-zagryazneniya-okruzhayuschey-sredy (Accessed 23 April 2025).

21. Petrov V. G., Khannanov D. A., Balitsky Ya. A Mobility of the chloride ions in sod-podzolic soil under pollution by chlorides of alkali metals. *Chemical Physics and Mesoscopy*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 290–295. (In Russ.) DOI: 10.15350/17270529.2019.2.31

22. *Rukovodstvo po upravleniyu zasolennymi pochvami* [Guidelines for the management of saline soils]. Ed. by R. Vargas, E. I. Pankova, S. A. Balyuk, P. V. Krasilnikov, G. M. Khasankhanova. Moscow: Food and Agriculture Organization of the United Nations; Moscow State University, 2017. 153 p. (In Russ.)

23. Selivanovskaya S. Yu., Galitskaya P. Yu. Otsenka toksichnosti pochv kontaktnoi metodikoi biotestirovaniya [Assessment of soil toxicity using the contact method of biotesting]. *Toksikologicheskii vestnik*, 2006, no. 4, pp. 12–15. (In Russ.)

24. Terekhova V. A. Pochvennoe biotestirovanie: podkhody i problemy [Soil biotesting: approaches and problems]. *Pochvovedenie*, 2011, no. 2, pp. 190–198. (In Russ.)

25. Terekhova V. A., Gladkova M. M. Inzhenernye nanomaterialy v pochve: problemy otsenki ikh vozdeistviya na zhivye organizmy [Engineering nanomaterials in soil: problems of assessing their effects on living organisms]. *Pochvovedenie*, 2014, no. 1, pp. 82–90. (In Russ.)

26. Timofeev M. A., Terekhova V. A., Kozhevin P. A. Pochvennoe biotestirovanie pri zagryaznenii kadmiem [Soil biotesting during cadmium contamination]. *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2010, no. 4, pp. 44–47. (In Russ.)

27. Tishin A. S. Fitotestirovanie pochv, zagryaznennykh nefteproduktami [Phytotesting of soils contaminated with petroleum products]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2020, Iss. 102, no. 12, pp. 78–83. (In Russ.) URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fitotestirovanie-pochv-zagryaznennyh-nefteproduktami (Accessed 23 April 2025)

28. Fomin G. S., Fomin A. G. *Pochva. Kontrol' kachestva i ekologicheskoi bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam* [Soil. Quality control and environmental safety according to international standards]. Moscow: "Protektor", 2001. 304 p. (In Russ.)

29. Khayrulina E. A., Novoselova L. V., Poroshina N. V. Natural and anthropogenic sources of soluble salts on the territory of the upper Kamapotash deposit. *Geographical bulletin*. 2017, no 1(40), pp. 93–101. (In Russ.) DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-93-101

30. Chudinova L. A., Orlova N. V. *Fiziologiya ustoichivosti rastenii* [Physiology of plant resistance]. Perm: Permskii universitet, 2006. 124 p. (In Russ.)

31. Shagidullin R. R., Latypova V. Z., Ivanov D. V., Shagidullina R. A., Tarasov O. Yu., Petrov A. M. Normirovanie dopustimogo ostatochnogo soderzhaniya nefti i produktov ee transformatsii v pochvakh [Rationing of the permissible residual content of oil and its transformation products in soils]. *Georesursy*, 2011, Iss. 41, no. 5, pp. 2–5. (In Russ.)

32. Chaignon V., Hinsinger P. A biotest for evaluating copper bioavailability to plants in a contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*, 2003, vol. 32, no. 3, pp. 824–833. DOI: 10.2134/jeq2003.8240

33. *Environmental aspects of phosphate and potash mining*. First edition. Paris: United Nations Publication, 2001. 62 p.

34. Fuleky G., Barna S. Biotesting of heavy metal pollution in the soil. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 93–102.

35. Gerasimova L., Eremina I., Kuklina A. Assessment of chemical soil pollution by biotesting. *The Scientific Heritage*, 2020, no. 45–2(45). Pp. 17–20.

36. Han L. P., Wang W. H., Eneji A. E., Liu J. Phytoremediating coastal saline soils with oats: accumulation and distribution of sodium, potassium, and chloride ions in plant organs. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 90, pp. 73–81. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.11.064

37. Krasavtseva E. A., Maksimova V. V. Application of the phytotesting method to assess the environmental impact of the waste of Lovozersky GOK LLC. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 548, no. 6, pp. 62–69. DOI: 10.1088/1755-1315/548/6/062063

38. Modina M., Heckert E., Shkoda V., Kuznetsova J. Biotesting in the assessment of vineyard soil toxicity. *BIO Web of Conferences*: International Scientific and Practical Conference "Agriculture and Food Security: technologies, innovations, markets, human resources", 2024. DOI: 10.1051/bioconf/202410300054

39. Rosa E. V. C., Giuradelli T. M., Correa A. X. R., Rörig L. R., Schwingel P. R., Resgalla Jr. C., Radetski C. M. Ecotoxicological evaluation of the short term effects of fresh and stabilized textile sludges before application in forest soil restoration. *Environmental Pollution*, 2007, vol. 146, no. 2, pp. 463–469. DOI: 10.1016/j.envpol.2006.07.005

40. Seemann J. R., Critchley C. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. *Planta*, 1985, vol. 164, no. 2, pp. 151–162.

41. Vasilyeva G. K., Kondrashina V. S., Strijakova E. R., Pinsky D. L. Express-phytotest for choosing conditions and following process of soil remediation. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, vol. 44, no. 2, pp. 433–445. DOI: 10.1007/s10653-020-00727-8

42. Wieczorek D., Kwapisz E., Marchut-Mikołajczyk O., Bielecki S. Phytotests as tools for monitoring the bioremediation process of soil contaminated with diesel oil. *BioTechnologia*, 2012, vol. 93, no. 4, pp. 431–439.

Статья поступила в редакцию: 20.05.25, одобрена после рецензирования: 08.07.25, принята к опубликованию: 11.06.26.

The article was submitted: 20 May 2025; approved after review: 8 July 2025; accepted for publication: 11 June 2026.

Информация об авторах
Анна Александровна Перевощикова
Младший научный сотрудник,
Естественнонаучный институт,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4
Аспирант,
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет;
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29

Information about the authors
Anna A. Perevoshchikova
Junior Researcher,
Natural Science Institute,
Perm State University;
4, Genkelya st., Perm, 614068, Russia
Postgraduate Student,
Perm National Research Polytechnic University;
29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614068, Russia

e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

Наталия Васильевна Митракова
Кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник,
Естественнонаучный институт,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4

Natalya V. Mitrakova
Candidate of Biological Sciences,
Senior Researcher, Natural Science Institute,
Perm State University;
4, Genkelya str, Perm, 614068, Russia

e-mail: mitrakovanatalya@mail.ru

Тимофей Сергеевич Бачурин
Лаборант Естественнонаучный институт,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4

Timofey S. Bachurin
Laboratory Assistant, Natural Science Institute,
Perm State University;
4, Genkelya st., Perm, 614068, Russia

e-mail: tima.bachurin@mail.ru

Никита Алексеевич Кобелев
Младший научный сотрудник
Естественнонаучный институт,
Пермский государственный
национальный исследовательский университет;
614068, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4

Nikita A. Kobelev
Junior Researcher, Natural Science Institute,
Perm State University;
4, Genkelya st., Perm, 614068, Russia

e-mail: amst3rz@gmail.com

Вклад авторов

Перевощикова А. А. – концепция исследования; анализ исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Митракова Н. В. – поиск литературы; анализ исследования; формулировка предварительных выводов.

Бачурин Т. С. – выполнение аналитических работ; поиск литературы.

Кобелев Н. А. – выполнение аналитических работ; поиск литературы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Anna A. Perevoshchikova – methodology development; research analysis; writing of the draft; final conclusions.

Natalya V. Mitrakova – literature search; research analysis; preliminary conclusions.

Timofey S. Bachurin – analytical work; literature search.

Nikita A. Kobelev – analytical work; literature search.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.