



Продуктивность и качество клубней картофеля при внесении калия и магния на фоне азотно-фосфорных удобрений

© 2024 Н. Б. Наумова , Т. В. Нечаева , О. А. Русалимова , О. А. Савенков , В.Н. Якименко 

ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, проспект Академика Лаврентьева, 8/2, г. Новосибирск, 630090, Россия. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

Цель исследования – изучение влияния совместного внесения калия и магния на продукционные показатели и качество клубней картофеля на фоне градиента почвенно-экологических условий, сформированного пятью опытными участками, расположенными в лесостепной зоне Западной Сибири.

Место и время проведения. Микрополевой опыт по выращиванию картофеля среднераннего сорта Джелли с тремя вариантами удобрений (N100P60, N100P60+K100 и N100P60+K100+Mg100) в пятикратной повторности заложили на пяти участках с агросерыми почвами в Новосибирской области в 2023 году. Географические координаты месторасположения опытных участков варьировали в пределах 55°15'40" до 54°47'09" с.ш. и от 83°31'42" до 82°37' 56" в.д.

Методы. В данной работе вместо традиционного временного градиента (3–4 года проведения опыта на одном участке), используемого для учёта влияния разных погодных условий, с этой же целью применили пространственный градиент, позволивший дополнительно оценить влияние варьирования свойств почвы между опытными участками. Отобранные до закладки опыта почвенные образцы проанализировали на содержание органического вещества, нитратного и аммонийного азота, легкоподвижного фосфора, обменного калия и магния; также определили кислотность почвы ($pH_{вод}$) и её электропроводность. В ходе опыта непрерывно автоматически регистрировали температуру воздуха (на высоте 2 м от поверхности почвы) и почвы (на глубине 5 и 15 см). По окончании опыта, при уборке урожая учитывали число и массу клубней на каждой делянке, а также надземную фитомассу. После пяти месяцев хранения оценивали кулинарные свойства (вкус, цвет, аромат, мучнистость и рассыпчатость) отваренных клубней по гедонической шкале. Для статистической обработки полученных данных применили анализ дисперсии, главных компонент и множественной регрессии методом частных наименьших квадратов, для чего использовали пакет программ Statistica v. 13.1.

Основные результаты. Внесение калия на фоне азотно-фосфорных удобрений (вариант N100P60+K100) повысило урожай клубней картофеля на 30%, а надземной фитомассы – на 40%. Дополнительное внесение магния (N100P60+K100+Mg100) не оказало влияния на продукционные показатели картофеля, однако заметно повысило кулинарное качество клубней. Более половины дисперсии продукционных показателей картофеля связано с различием почвенно-экологических условий опытных участков. Основными почвенными свойствами, позволяющими прогнозировать продуктивность клубней, были содержание обменного магния, аммонийного азота, а также реакция среды ($pH_{вод}$). Вклад почвенно-экологических условий опытных участков в дисперсию оценок кулинарных свойств клубней был весьма незначителен, но, тем не менее, статистически значим для аромата и цвета ($p \leq 0,05$) с аналогичным трендом для вкуса и рассыпчатости ($0,05 \leq p \leq 0,10$). Агрохимические свойства почв – содержание органического углерода, легкоподвижного фосфора и нитратного азота, а также реакция среды, были определяющими в прогностической модели потребительских свойств будущего урожая.

Заключение. Проведённые исследования на агросерых почвах в лесостепной зоне Западной Сибири подтвердили важность оптимизации минерального питания картофеля. Внесение сбалансированных доз НРК удобрений существенно повышало продуктивность выращиваемого картофеля по сравнению с использованием только NP; дополнительное к НРК внесение Mg не приводило к дальнейшему росту урожайности, однако заметно улучшало кулинарные свойства клубней. Результаты статистического анализа полученных экспериментальных данных выявили тесную зависимость продуктивности картофеля (и, в заметной степени, качества клубней) от почвенных свойств (эффективное плодородие) и погодных условий вегетационного периода (температура почвы и воздуха), что целесообразно использовать в прогностических моделях величины и качества будущего урожая.

Ключевые слова: Западная Сибирь; агросерая почва; минеральные удобрения; картофель; органолептические свойства клубней; почвенно-экологические условия.

Цитирование: Наумова Н.Б., Нечаева Т.В., Русалимова О.А., Савенков О.А., Якименко В.Н. Продуктивность и качество клубней картофеля при внесении калия и магния на фоне азотно-фосфорных удобрений // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 2. e268. DOI: [10.31251/pos.v7i2.268](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.268).

ВВЕДЕНИЕ

Картофель является одной из основных сельскохозяйственных культур во всем мире, в том числе и в России, имея пищевое, кормовое и техническое назначение. Ежегодное производство картофеля всеми типами хозяйств нашей страны составляет более десяти миллионов тонн: по данным Международной сельскохозяйственной и продовольственной организации ООН (FAOSTAT ..., 2024) в 2022 г. Россия получила 18,9 млн тонн картофеля, став четвертым производителем в мире, после Китая, Индии и Украины. По итогам 2023 года, согласно информации ФГБУ «Центр Агроаналитики» Министерства сельского хозяйства России (Центр ..., 2024), производство картофеля в организованном секторе страны составило 8,6 млн тонн.

В последние годы интерес к картофелю как основе для разработки новых функциональных продуктов питания (Xu et al., 2023) и модификации с той же целью традиционных (Singh et al., 2021) возрос. Важность сбалансированного обеспечения картофеля питательными элементами трудно переоценить (Koch et al., 2020a). Ранее было отмечено, что внесение удобрений может вызвать дефицит магния (Knoblauch, Ödland, 1934). В настоящее время во всем мире из-за распространения интенсивных технологий сельскохозяйственного производства вынос магния приводит к его недостатку в почве (Tein et al., 2014), что становится все более распространенным явлением. Дефицит магния, который выполняет роль кофактора в более 300 биохимических процессах, ухудшает синтез хлорофилла, транспорт сахаров и энергетический метаболизм растений, снижая их рост и развитие (Аристархов, 2002; Тихомирова, 2011; Koch et al., 2019). Так, у паслёновых выявлено снижение роста корней при дефиците магния (Koch et al., 2020b; Ishfaq et al., 2021). Внесение магниевых удобрений становится все более актуальным для повышения продукции сельскохозяйственных культур (Wang et al., 2020). Однако совместное применение калия и магния может нарушить баланс этих элементов в растении, что, в свою очередь, способно повлиять не только на производственные показатели, но и на пищевые свойства выращиваемых культур, в том числе, клубней картофеля. Поэтому для разных агрономических контекстов (Yakimenko, Naumova, 2021) необходимо изучать оптимальное соотношение питательных элементов, вносимых с удобрениями.

Целью работы было изучение влияния совместного внесения калия и магния на производственные показатели и качество клубней картофеля на фоне градиента почвенно-экологических условий, сформированного пятью опытными участками, расположенными в лесостепной зоне Западной Сибири.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные участки. Микрополевым опытом заложен в 2023 г. на пяти участках в различных административных районах Новосибирской области в лесостепной зоне со следующими координатами: У-1 – 55,091594° с.ш., 83,020692° в.д.; У-2 – 54,965379° с.ш., 83,219413° в.д.; У-3 – 54,982721° с.ш., 82,379481° в.д.; У-4 – 54,785833° с.ш., 83,087222° в.д.; У-5 – 55,260964° с.ш., 83,528411 в.д. Почвы – агросерые среднесуглинистые (Классификация ..., 2004), длительное время находящиеся в сельскохозяйственном использовании. Характеристика почв пяти опытных участков представлена в табл. 1. Перед закладкой опыта (до внесения удобрений и посадки картофеля) почвы экспериментальных участков имели высокое содержание органического углерода, нейтральную и слабощелочную реакцию среды, что благоприятно для нормального роста и развития большинства сельскохозяйственных культур (Шпаар и др., 2004). Согласно существующим грациям, обеспеченность почв нитратным азотом варьировала от средней до высокой (Агрохимические свойства ..., 1989, с. 42, табл. 23), легкоподвижным фосфором – от средней до очень высокой (Аверкина, Науменко, 2017, с. 58, табл. 3), обменным калием – от низкой до повышенной при выращивании картофеля (Якименко, 2003, с. 142, табл. 43; Якименко, 2005, с. 12, табл. 3), обменным магнием – от средней до очень высокой (Методические указания ..., 2003, с. 183, прилож. 35). В целом же, проведение опыта на участках с исходно различающимися почвенными свойствами позволяет, на наш взгляд, установить не только действие внесения калия на фоне NP-удобрений как отдельно, так и в комбинации с магнием (NP+K+Mg), но и распространить полученный результат и на другие почвы со свойствами в пределах изученного в опыте диапазона.

Таблица 1

Свойства почв разных опытных участков (среднее \pm стандартное отклонение)

Показатель*	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
pH _{вод}	7,62 \pm 0,21 b**	7,74 \pm 0,07 b	7,96 \pm 0,05 c	7,04 \pm 0,11 a	7,04 \pm 0,07 a
C _{орг} , %	4,1 \pm 0,1 a	8,3 \pm 0,1 c	13,7 \pm 0,6 d	5,8 \pm 0,7 b	7,6 \pm 0,1 c
C _{неорг} , %	0,2 \pm 0,0 a	0,5 \pm 0,1 b	1,6 \pm 0,3 c	0,2 \pm 0,0 a	0,4 \pm 0,0 ab
P-P ₂ O ₅ , мг/кг	1,2 \pm 0,5 a	5,9 \pm 1,0 b	5,4 \pm 5,0 b	0,5 \pm 0,4 a	0,7 \pm 0,3 a
N-NO ₃ , мг/кг	11 \pm 6 a	19 \pm 5 a	163 \pm 104 b	31 \pm 7 a	9 \pm 2 a
N-NH ₄ , мг/кг	2,4 \pm 1,0 a	4,4 \pm 0,8 a	8,7 \pm 1,9 b	3,9 \pm 0,4 a	7,8 \pm 1,5 b
K, мг/кг	130 \pm 25 a	105 \pm 20 a	960 \pm 488 b	61 \pm 6 a	176 \pm 5 a
Mg, мг/кг	181 \pm 17 a	343 \pm 35 b	913 \pm 36 d	151 \pm 18 a	506 \pm 1 c
K/Mg	0,45 \pm 0,11 ab	0,19 \pm 0,02 a	0,66 \pm 0,35 b	0,25 \pm 0,03 a	0,22 \pm 0,01 a
ЕС, μ S	177 \pm 25 a	108 \pm 22 a	623 \pm 167 b	128 \pm 9 a	96 \pm 2 a

Примечание.

* – здесь и в табл. 9 представлены такие почвенные свойства как кислотность (pH_{вод}); содержание органического (C_{орг}) и неорганического углерода (C_{неорг}), легкоподвижного фосфора (P-P₂O₅), нитратного (N-NO₃) и аммонийного азота (N-NH₄), обменной формы калия (K) и магния (Mg); электропроводность (ЕС). Соотношение K/Mg рассчитано на основе атомных масс K и Mg. ** – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне P=0,05, тест Фишера).

Схема опыта. Опыт проводили с картофелем (*Solanum tuberosum* L.) сорта Джелли, включенным в Госреестр с 2005 года (Государственный реестр ..., 2024); сорт среднеранний столового назначения. Минеральные удобрения в трёх вариантах (NP как общий фон, NP+K и NP+K+Mg) вносили на пяти участках по одинаковой (рэндомизированной) схеме в пятикратной повторности. На делянку размером 0,5 \times 0,5 м высаживали по одному откалиброванному клубню, предварительно внося удобрения в дозе 10 г/м² N, 6 г/м² P, по 10 г/м² K и Mg (примерно 100 кг N, 60 кг P, по 100 кг K и Mg на га) в соответствующих схеме опыта комбинациях в виде аммонийной селитры, двойного суперфосфата, хлористого калия и оксида магния. На всех опытных участках агротехника в течение вегетационного сезона была одинаковой.

Выбор вариантов и доз по внесению минеральных удобрений при выращивании картофеля связан с рядом причин:

(1) Уже достаточно давно в научной печати сообщается о нарастающем истощении фонда калия и магния в агропочвах не только легкого, но и более тяжёлого гранулометрического состава (Мазаева, 1977; Прокошев, Дерюгин, 2000; Аристархов, 2002; Якименко, 2003, 2021; Афанасьев, 2005; и др.); эти процессы значительно усиливаются в интенсивных агроценозах с внесением только азотных или азотно-фосфорных удобрений. В этой связи исследования по изучению действия калия на фоне NP-удобрений как отдельно, так и в комбинации с магнием (NP+K+Mg) представляются достаточно актуальными.

(2) Сельскохозяйственные культуры могут испытывать недостаток, в первую очередь, в азотном питании, поэтому в агроценозах чаще всего применяют азотные либо азотно-фосфорные удобрения. В то же время использование только NP-удобрений для калиелюбивых культур (к числу которых относится и картофель) является «большим из зол», чем эксплуатация естественного почвенного плодородия (Якименко, 2003, с. 43). Поэтому в нашем опыте было решено изучить влияние внесения калия и его сочетания с магнием (на фоне NP-удобрений) на продукционный процесс и потребительские свойства картофеля.

(3) Выбор доз минеральных удобрений (N, K и Mg по 100, P – 60 кг д.в./га) основан на результатах длительного полевого опыта на научном стационаре ИПА СО РАН, проводимого В.Н. Якименко на серой лесной среднесуглинистой почве в условиях лесостепи Западной Сибири: оптимальная доза калия при выращивании картофеля столового назначения составила 90–120 кг д.в./га в соотношении N:P:K равном 1:(0,5-0,6):(1-1,2) (Якименко, 2017); оптимальная доза магния составила порядка 20–30 кг/га с совместным внесением калия (90–120 кг/га) на фоне азотно-фосфорных удобрений (N – 90–120, P – 60 кг/га) (Якименко, 2021).

На каждом опытном участке были установлены автоматические регистраторы, записывающие температуру каждые два часа в тени в приземном (2 м от поверхности) слое воздуха, а также в почве на глубине 5 и 15 см. Регистраторы были установлены в двух повторностях на каждом участке. После

обработки записанных показаний по окончании опыта были рассчитаны суммы дневных, ночных и суточных температур (табл. 2) за период вегетации картофеля (с 2–5 июня по 2–5 сентября 2023 года).

Таблица 2

Суммы температур ($^{\circ}\text{C}\times\text{сут}$) воздуха и почвы на опытных участках (среднее \pm стандартное отклонение)

Показатель	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Воздух, 2 м от поверхности почвы					
Сумма ночных температур	441 \pm 14	407 \pm 2	419 \pm 7	564 \pm 36	397 \pm 7
Сумма дневных температур	1498 \pm 8	1312 \pm 10	1523 \pm 106	1466 \pm 15	1174 \pm 12
Сумма температур	1938 \pm 6	1720 \pm 8	1942 \pm 113	2029 \pm 51	1571 \pm 19
Почва, глубина 5 см					
Сумма ночных температур	505 \pm 12	504 \pm 3	493 \pm 19	581 \pm 34	495 \pm 32
Сумма дневных температур	1252 \pm 23	1182 \pm 125	1071 \pm 131	1314 \pm 69	1053 \pm 67
Сумма температур	1757 \pm 10	1686 \pm 128	1564 \pm 150	1895 \pm 103	1548 \pm 99
Почва, глубина 15 см					
Сумма ночных температур	540 \pm 32	515 \pm 11	496 \pm 11	562 \pm 10	475 \pm 23
Сумма дневных температур	1190 \pm 113	1135 \pm 19	1048 \pm 67	1146 \pm 14	962 \pm 24
Сумма температур	1630 \pm 146	1650 \pm 8	1544 \pm 78	1708 \pm 23	1437 \pm 48

Отбор и анализ почвенных образцов. Образцы почвы из слоя 0–20 см отбирали в начале опыта перед внесением удобрений и посадкой картофеля. Содержание органического ($C_{\text{орг}}$) и неорганического ($C_{\text{неорг}}$) углерода в почве рассчитали по потере массы при ступенчатом прокаливании (Wang et al., 2011). Образцы почвы анализировали стандартными почвенно-агрохимическими методами (Практикум по агрохимии, 2001): содержание нитратного азота (N-NO_3) и легкоподвижного фосфора ($\text{P-P}_2\text{O}_5$) определили в вытяжке 0,015 М K_2SO_4 при соотношении почва:экстрагент равным 1:5; аммонийного азота (N-NH_4) – в вытяжке 0,25 М K_2SO_4 (почва:экстрагент = 1:10); обменной формы калия (K) и магния (Mg) – атомно-абсорбционным методом в вытяжке 1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (почва:экстрагент = 1:10); кислотность почвы ($\text{pH}_{\text{вод}}$, почва : вода = 1:2,5) и её электропроводность (ЕС) – потенциометрическим методом. Содержание углерода и макроэлементов рассчитали на сухую массу почвы (105 $^{\circ}\text{C}$ в течение 6 часов).

Отбор растительных образцов. Отбор образцов надземной и подземной фитомассы провели в конце периода вегетации картофеля при его уборке 2–5 сентября 2023 года. Учитывали массу ботвы, клубней (товарных и нетоварных), число клубней и максимальную массу клубня с каждой делянки. Расчёты надземной и подземной фитомассы картофеля в таблицах представлены на сырую массу.

Органолептический анализ. Кулинарные свойства выращенных клубней картофеля оценивали по таким показателям как вкус, аромат, цвет, рассыпчатость и мучнистость с использованием гедонической шкалы (Kreutzmann et al., 2011) в баллах: оценка 1 балл обозначала «очень не нравится», 2 – «не нравится», 3 – «скорее не нравится», 4 – «ни нравится, ни не нравится», 5 – «скорее нравится», 6 – «нравится» и 7 баллов – «очень нравится». Оценку провела группа экспертов-дегустаторов, состоящая из 5 мужчин и 5 женщин возрастом от 30 до 72 лет (средний возраст 44,4 \pm 13,2). Для дегустации объединили клубни с 5-ти повторностей каждого варианта на каждом участке, получив таким образом 15 образцов клубней для тестирования (5 участков \times 3 варианта). Для более полного проявления вкуса клубни дегустировали после нескольких месяцев хранения (Jansky, 2008). Клубни варили в кожуре для лучшего сохранения пищевкусных свойств и возможности выявить их различия (Wszelaki et al., 2005); дегустировали остывшими до 45–50 $^{\circ}\text{C}$.

Статистический анализ. Статистический анализ проводили с помощью пакета программ Statistica v.13.3 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA). В общей линейной модели дисперсионного анализа внесение удобрений считали фиксированным фактором, а удаленные друг от друга экспериментальные участки рассматривали как случайный фактор. Регрессионные модели строили методом частных наименьших квадратов (Partial Least Squares, PLS).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продукция картофеля. Дисперсионный анализ выявил статистически значимое влияние фактора «опытный участок» на все изученные показатели продукции картофеля (табл. 3), при этом фактор обусловил значительную часть дисперсии массы клубней и надземной фитомассы. Напомним, что этот фактор является комбинированным, то есть включает в себя всё разнообразие окружающей среды (от почвенных свойств до погодных условий). Фактор «удобрение» – заметим, означающий внесение только калия и магния, так как во всех вариантах опыта внесено одинаковое количество минеральных азотно-фосфорных удобрений – оказал влияние на массу клубней и общую фитомассу растения; при этом вероятность отсутствия влияния этого фактора на остальные показатели продукции мы считаем незначительной ($0,05 \leq p \leq 0,010$), за исключением отношения надземной фитомассы к массе клубней (см. табл. 3).

Таблица 3

Вклад факторов (%) в дисперсию показателей продукции картофеля

Показатель	Фактор		
	Опытный участок (ОУ)	Удобрение (Уд)	Взаимодействие ОУ × Уд
Число клубней	22 (0,001)*	6 (0,064)	11 (0,240)
Масса клубней	35 (0,000)	8 (0,006)	15 (0,014)
Максимальная масса клубня	23 (0,000)	5 (0,084)	21 (0,006)
Средняя масса клубня	17 (0,009)	6 (0,091)	12 (0,239)
Надземная фитомасса	61 (0,000)	3 (0,090)	4 (0,435)
Общая фитомасса,	51 (0,000)	6 (0,009)	9 (0,057)
Надземная фитомасса/масса клубней	42 (0,000)	1 (0,581)	6 (0,549)

Примечание.

* – вероятность p отсутствия влияния фактора.

Внесение калия на фоне азотно-фосфорных удобрений (вариант NP+K) привело к повышению показателей продуктивности, кроме максимальной массы клубней и соотношения надземной фитомассы к массе клубней (табл. 4). Так, масса клубней на одно растение увеличилась в 1,3 раза по сравнению с вариантом NP и в 1,2 раза по сравнению с вариантом NP+K+Mg. Последний вариант не отличался от варианта NP+K ни по каким показателям, кроме числа и массы клубней: по этим показателям вариант NP+K+Mg оказался близким к варианту NP. Внесение калия увеличило надземную фитомассу в 1,4 раза.

Таблица 4

Структура урожая картофеля при внесении разных удобрений (среднее по всем опытным участкам ± стандартное отклонение, $n=25$ для каждого варианта удобрения)

Показатель	Удобрение		
	NP (контроль)	NP+K	NP+K+Mg
Число клубней, шт./растение	8,0 ± 3,5 a*	9,3 ± 2 b	7,6 ± 2,5 a
Масса клубней, г/растение	767 ± 466 a	1020 ± 427 b	836 ± 388 a
Максимальная масса клубня, г/растение	164 ± 91 a	197 ± 74 ab	208 ± 96 b
Средняя масса клубня, г/растение	89 ± 46 a	114 ± 47 b	111 ± 46 ab*
Надземная фитомасса, г/растение	678 ± 666 a	932 ± 668 b	794 ± 566 ab
Общая фитомасса, г/растение	1405 ± 1021 a	1952 ± 954 b	1629 ± 758 ab*
Отношение надземной фитомассы к массе клубней	1,1 ± 0,8 a	1,0 ± 0,6 a	1,2 ± 1,0 a

Примечание.

* – разные буквы в строках означают, что значения различны ($p \leq 0,05$, НСР-тест Фишера).

Между участками выявлены различия по всем продукционным показателям картофеля, в том числе по соотношению надземной массы к массе клубней (табл. 5).

Таблица 5

Структура урожая картофеля на разных опытных участках (среднее по всем вариантам удобрения на участке ± стандартное отклонение, n=15 для каждого участка)

Показатель	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Число клубней, шт./растение	8 ± 2 ab*	9 ± 3 bc	10 ± 4 c	6 ± 1 a	9 ± 2 bc
Масса клубней, г/растение	738 ± 382 b	806 ± 441 b	1242 ± 448 c	483 ± 189 a	1034 ± 288 c
Максимальная масса клубня, г/растение	176 ± 72 ab	194 ± 104 b	266 ± 86 c	140 ± 61 a	171 ± 68 ab
Средняя масса клубня, г/растение	96 ± 46 ab	90 ± 44 ab	134 ± 52 c	84 ± 41 a	120 ± 34 bc
Надземная фитомасса, г/растение	666 ± 343 b	550 ± 288 ab	1734 ± 750 c	757 ± 247 b	299 ± 130 a
Общая фитомасса, г/растение	1404 ± 557 a	1356 ± 703 a	2976 ± 1073 b	1239 ± 427 a	1334 ± 367 a
Отношение надземной фитомассы к массе клубней	1,2 ± 1,1 b	0,7 ± 0,2 a	1,5 ± 0,7 b	1,7 ± 0,4 b	0,3 ± 0,1 a

Примечание.

* – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне P=0,05, тест Фишера).

Анализ методом главных компонент матрицы почвенных свойств и матрицы продукционных показателей картофеля выявил чёткое группирование опытных участков в пространстве первых двух главных компонент по почвенным свойствам (рис. 1, А) и значительно менее чёткое группирование – по продукционным показателям участков (рис. 1, Б).

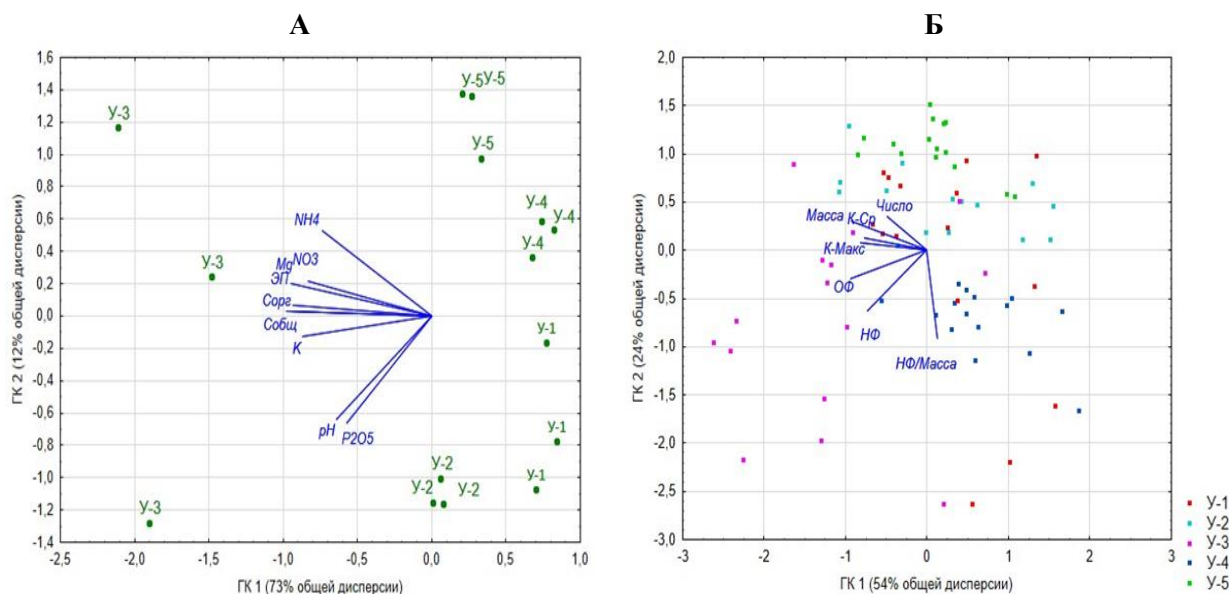


Рисунок 1. Расположение опытных участков в плоскости первых двух главных компонент (ГК 1 и ГК 2) при анализе почвенных свойств до начала опыта (А) и продукционных показателей картофеля (Б). Обозначения: У-1 ... У-5 – разные опытные участки. Почвенные свойства: реакция среды (pH); содержание органического (С_{орг}) и общего углерода (С_{общ}), легкоподвижного фосфора (P₂O₅), нитратного (NO₃) и аммонийного азота (NH₄), обменной формы калия (К) и магния (Mg); электропроводность (ЭП). Продукционные показатели: Число – количество клубней с одного растения; Масса – масса клубней с одного растения; К-Ср и К-Макс – средняя и максимальная масса клубня на растении, соответственно; ОФ и НФ – общая и надземная фитомасса, соответственно.

Оценка кулинарного качества клубней. Оба фактора, т.е. «опытный участок» и «удобрение» (подразумевается только К и Mg на фоне NP-удобрений), внесли весьма незначительный вклад в общую дисперсию свойств, в том числе в случаях, когда влияние фактора оказалось статистически значимым (табл. 6). На уровне 0,05 ≤ p ≤ 0,010 мы считаем значимым влияние фактора «опытный

участок» на вкус и рассыпчатость клубней, а фактора «удобрение» на их рассыпчатость, исходя из того, что в этих случаях объём выборки оказался несколько недостаточным для достижения уровня $p \leq 0,05$.

Таблица 6

Вклад факторов (%) в дисперсию оценки кулинарных свойств клубней картофеля

Показатель	Фактор		
	Опытный участок (ОУ)	Удобрение (Уд)	Взаимодействие ОУ × Уд
Вкус	6 (0,068)*	5 (0,032)	4 (0,681)
Аромат	6 (0,003)	3 (0,011)	1 (0,984)
Цвет	10 (0,005)	1 (0,125)	2 (0,914)
Рассыпчатость	6 (0,066)	4 (0,065)	4 (0,704)
Мучнистость	2 (0,736)	3 (0,300)	8 (0,125)

Примечание.

* – в скобках указана вероятность отсутствия влияния фактора.

Оценка всех кулинарных свойств клубней, за исключением цвета, была выше в варианте NP+K+Mg по сравнению с вариантом NP+K, который не отличался от варианта NP (табл. 7).

Таблица 7

Оценка кулинарных свойств клубней картофеля (средний балл ± стандартное отклонение)

Показатель	Удобрение		
	NP	NP+K	NP+K+Mg
Вкус	4,8 ± 1,3 ab*	4,5 ± 1,5 a	5,3 ± 1,2 b
Аромат	5,2 ± 1,1 ab	4,9 ± 1,4 a	5,3 ± 1,1 b
Цвет	5,1 ± 1,1 a	5,1 ± 1,3 a	5,4 ± 1,2 a
Рассыпчатость	4,7 ± 1,4 ab	4,5 ± 1,4 a	5,1 ± 1,1 b
Мучнистость	4,6 ± 1,3 ab	4,4 ± 1,3 a	4,9 ± 1,2 b

Примечание.

* – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне $P=0,05$, тест Фишера).

Фактор «опытный участок» оказал влияние на органолептическую оценку всех свойств клубней картофеля (особенно на вкус) за исключением мучнистости (табл. 8).

Таблица 8

Органолептическая оценка клубней картофеля с разных опытных участков ± стандартное отклонение)

(среднее

Показатель	Опытный участок				
	У-1	У-2	У-3	У-4	У-5
Вкус	4,2 ± 1,5 a*	5,1 ± 1,4 b	5,2 ± 1,3 b	5,0 ± 1,2 b	4,9 ± 1,3 b
Аромат	4,6 ± 1,5 a	5,0 ± 1,3 ab	5,5 ± 1,0 b	5,3 ± 1,0 b	5,2 ± 1,1 ab
Цвет	4,6 ± 1,7 a	5,5 ± 1,0 b	5,6 ± 1,0 b	5,0 ± 0,9 ab	5,3 ± 0,9 b
Рассыпчатость	4,7 ± 1,4 a	4,7 ± 1,4 a	5,4 ± 1,1 b	4,7 ± 1,1 a	4,4 ± 1,3 a
Мучнистость	4,4 ± 1,6 a	4,7 ± 1,4 a	4,9 ± 1,1 a	4,5 ± 1,0 a	4,5 ± 1,4 a

Примечание.

* – разные буквы в строках обозначают различие между значениями (на уровне $P=0,05$, тест Фишера).

Регрессия методом частных наименьших квадратов, проведённая для выявления роли почвенных свойств и температурных показателей в определении продукционных и кулинарных характеристик картофеля, позволила получить представленные в таблице 9 коэффициенты. По величине модуля этих коэффициентов можно судить о значимости вклада предикторов в предсказание величины зависимой переменной.

Таблица 9

Стандартизованные коэффициенты регрессии (методом частных наименьших квадратов) продукционных и кулинарных свойств картофеля

Предиктор	Зависимая переменная				
	Масса клубней	Надземная фитомасса	Вкус	Аромат	Цвет
Регрессия с почвенными свойствами					
pH _{вод}	0,64¹	-0,12	-0,99	-1,03	-0,49
Сорт	-0,24	0,19	0,89	0,70	0,64
P-P ₂ O ₅	-0,26	0,02	0,85	0,33	0,70
N-NO ₃	-0,60	0,64	0,68	0,84	0,19
N-NH ₄	0,61	-0,31	0,07	0,01	0,33
K	0,24	0,22	-0,30	-0,07	-0,22
Mg	0,76	-0,24	-0,43	0,40	0,02
ЕС	-0,05	0,43	-0,18	-0,11	-0,28
Регрессия с суммами температур					
T _{воздуха} , день	0,29	0,62	-0,03	0,22	-0,02
T _{воздуха} , ночь	-0,12	0,03	0,09	0,32	-0,05
T _{воздуха} , сутки	0,19	0,51	0,03	0,30	-0,01
T _{почвы 5 см} , день	-0,40	0,65	-1,13	-0,86	-1,06
T _{почвы 5 см} , ночь	0,09	-0,17	0,84	0,71	0,63
T _{почвы 5 см} , сутки	-0,34	-0,47	-0,67	-0,50	-0,67
T _{почвы 15 см} , день	-0,19	-0,26	-0,58	-0,69	-0,47
T _{почвы 15 см} , ночь	-0,26	-0,34	-0,73	-0,52	-0,70
T _{почвы 15 см} , сутки	0,15	0,74	2,03	1,05	1,87

Примечание.

Жирным шрифтом выделены по три наибольших по модулю коэффициента для каждого показателя, что соответствует вкладу предикторов в регрессионную модель.

ОБСУЖДЕНИЕ

Средний по всем участкам и вариантам опыта урожай картофеля составил $0,86 \pm 0,44$ кг клубней на одно растение с делянки площадью $0,25 \text{ м}^2$, что эквивалентно $3,44 \text{ кг/м}^2$ или $34,4 \text{ т/га}$. Это в два раза выше, чем средняя по всем хозяйствам страны урожайность в 2022 г., составившая $17,4 \text{ т/га}$ (FAOSTAT ..., 2024), но близко к урожаям, полученным рядом исследователей в Новосибирской (Галеев и др., 2021; Якименко, 2021) и Воронежской областях (Верховцева и др., 2023), лесостепи Среднего Поволжья (Артамонов и др., 2019), а также в Чехии (Hlisnikovský et al., 2021) и Корее (Bak et al., 2024). В нашей работе в варианте с внесением NPK-удобрений (т.е. без магния), масса клубней с одного растения (тоже среднераннего сорта) была в точности такая же, как в аналогичном по удобренности варианте в Белоруссии (Талашова, 2019).

Проведённый опыт, как и ожидали, выявил увеличение почти всех продукционных показателей картофеля при внесении калия на фоне NP-удобрений. Известно, что внесение калийного удобрения стимулирует транслокацию фотоассимилятов в клубни, повышая их продукцию (Beringer et al., 1983). Однако такое же количество калия, но внесённое вместе с магнием (NP+K+Mg), привело к увеличению только максимальной массы клубня по сравнению с вариантом NP, не вызвав соответствующего увеличения других показателей. Этот результат позволяет предположить, что внесение магния и динамика его доступности стимулировали процессы, для поддержки которых калия оказалось недостаточно. Косвенно об этом свидетельствует и выявленный факт несколько лучших потребительских свойств клубней при внесении магния. Картофель имеет довольно поверхностную и слабо разветвленную корневую систему (Меркушева и др., 2004; Dechassa et al., 2003; Hopkins, Hansen, 2019; Kirchgesser et al., 2023), охватывающую небольшой объём почвы для извлечения воды и питательных элементов, из-за чего является не очень эффективной культурой в этом плане (Hopkins et al., 2014). Поэтому внесённый в слаборастворимой форме оксида магний мог оставаться доступным для растений дольше калия, внесённого в виде хорошо растворимого хлорида; возможно, что ионы калия расходились по компонентам и процессам круговорота элемента в почве и/или вымывались осадками из корнеобитаемого слоя ещё до заметного развития подземной части растений. В связи с этим динамика соотношения калия и магния в доступной форме могла оказаться менее благоприятной для продукции клубней в почве варианта с внесением NP+K+Mg. Весьма вероятно, что такой механизм лежал в основе проявления действия атмосферных осадков на эффективность внесённых удобрений, в

том числе магния (тоже в виде оксида), в длительном (с 1962 г.) полевом опыте в Венгрии (Márton, 2004). Есть и другие исследования, не выявившие влияния внесения магния на продукцию клубней (Скрябин, 2023; Assunção et al., 2020; Osowski et al., 2017). Следует отметить, что действие удобрений в зависимости от температуры также отражается на продуктивности клубней и надземной фитомассы картофеля (Nielsen et al., 1961).

Несмотря на заметный эффект от внесения калия на урожай клубней (повышение на 30%), вклад фактора удобрений в общее варьирование продукционных показателей картофеля не превышал 10%. Это в значительной степени связано с тем, что во всех вариантах опыта было внесено одинаковое количество азотно-фосфорных удобрений (фон), а то, что мы назвали для краткости фактором удобрения, обозначает только дополнительное внесение калия и магния; поэтому и неудивительно небольшое варьирование, обусловленное этими элементами.

Напомним, что фактор «опытный участок» включает совместное действие разных факторов окружающей среды – эдафических и погодных. Если некоторые факторы – почвенные и температурные – мы определили, то осадки и фотосинтетически активную радиацию (ФАР) солнца не измеряли в связи с отсутствием соответствующих регистрирующих приборов. Полученные результаты позволяют предположить, что именно осадки и фотосинтетически активная солнечная радиация были основными факторами, варьирование которых в пределах градиента расположения опытных участков внесло основной вклад в варьирование продукционных особенностей картофеля в рассматриваемом опыте. В этой связи необходимо подчеркнуть, что одним из основных требований к полевому опыту традиционно и обоснованно является его стационарное проведение по одной и той же схеме в течение минимум трёх-четырёх лет именно для того, чтобы оценить влияние меняющихся год от года погодных условий на изучаемый показатель продукции той или иной сельскохозяйственной культуры на фоне одних и тех же почвенных свойств. При этом, строго говоря, полученные результаты относятся только к почвам со свойствами, близкими к таковым в почве опыта. Замена такого временного градиента пространственным – а это является стандартной практикой экологических исследований, позволяющей оценить скорость сукцессии, например, на отвалах или залежах разного возраста (Титлянова и др., 1988; Миллер и др., 2023) – позволила не только установить действие внесения калия на фоне NP-удобрений как отдельно, так и в комбинации с магнием (NP+K+Mg), но и распространить полученный результат на другие почвы со свойствами в пределах изученного в опыте диапазона.

Заметим, что по итогам опыта в Чехии на трёх участках четыре года подряд также выявлено заметно большее влияние месторасположения опытных участков на урожай картофеля (Hlisnikovský et al., 2021); при этом внесение удобрений (навоза, NPK) по степени влияния на урожай находилось после погодных условий. В том исследовании, в отличие от нашей работы, учитывали и осадки, и температуру, но не оценивали варьирование фотосинтетически активной радиации между участками и годами, которая, на наш взгляд, является одним из основных факторов, определяющих продуктивность растений. В целом, наши результаты свидетельствуют, что картофель является культурой, весьма чувствительной к почвенно-погодным условиям произрастания; это подчеркивают и другие исследователи (Кириллова, Жуков, 2005; Убугунов, Меркушева, 2019; Chang et al., 2018; Osowski et al., 2017).

Оценка общей биологической продукции любых сельскохозяйственных культур важна как для оценки физиологического состояния растений (в том числе отношения фотосинтезирующей фитомассы к массе товарной продукции), так и для оценки выноса растениями питательных элементов и возможного заметного (в зависимости от культуры и технологии возделывания) их отчуждения из почвенной экосистемы. В нашем опыте соотношение надземной фитомассы картофеля к массе клубней было одинаковым по разным вариантам опыта. Однако заметная разница по этому показателю между некоторыми участками также может косвенно говорить о разнице по ФАР.

Выявленная наибольшая зависимость прогнозируемой продукции клубней от содержания обменного магния в почве перед началом опыта связана, вероятнее всего, с участием этого элемента в процессах фотосинтеза и транслокации фотоассимилятов в клубни. Положительная зависимость величины подземной и надземной продукции картофеля от суммы дневных температур воздуха может свидетельствовать о стимулировании роста (и, как можно предположить, фотосинтеза) растений более высокой температурой. В то же время, транслокация фотоассимилятов в подземную сферу могла быть несколько снижена более высокой температурой почвы в слое 0–5 см, о чём свидетельствует отрицательный коэффициент в уравнении регрессии продукции клубней с температурными характеристиками (см. табл. 9). Хотя в течение вегетации были краткие периоды с нетипично высокими для региона дневными температурами 36–38°C и выше, что могло замедлить образование и

рост клубней (Koch et al., 2024), в целом за вегетационный сезон температура воздуха не оказывала отрицательного воздействия на рост надземной фитомассы картофеля или же оно могло быть компенсировано более благоприятными (по количеству и распределению в сезоне) осадками (Hlisnikovský et al., 2021).

Несмотря на быстрый прогресс и увеличение доступности хроматографических, спектральных, протеомных, метаболомных и других методов анализа химического состава сельскохозяйственной продукции, они не отменяют и даже повышают необходимость оценки потребительских свойств продукции путём дегустации (Vechoff et al., 2023); в современных программах селекции картофеля стараются сбалансировать агрономические свойства сортов с потребительскими (Drapal et al., 2022). В последние годы с появлением новых сортов активнее стали изучать влияние окружающей среды и разных агрономических технологий возделывания, в том числе систем удобрения, на кулинарное и пищевое качество картофеля (Bražinskienė et al., 2014; Li et al., 2023). В нашей работе выявлено значительное увеличение вкусовых свойств клубней при дополнительном внесении магния по сравнению с вариантом с внесением только калия на фоне азотно-фосфорных удобрений: это совпадает с результатами, полученными польскими исследователями тоже на среднераннем сорте (Retmańska et al., 2023).

Выявленную в нашем опыте зависимость потребительских свойств клубней от содержания органического углерода в почве (положительную) и величины $pH_{вод}$ (отрицательную) сравнить с другими результатами не смогли, так как подобных работ найти не удалось. Есть, однако, опубликованные результаты исследований о влиянии почвенных свойств на биохимические свойства клубней: например, с использованием (как и в нашей работе) регрессии методом частных наименьших квадратов показана ведущая роль pH почвы в формировании полезных биохимических свойств клубней (Xing et al., 2020). Однако сравнивать наши результаты с данными этого и подобных исследований трудно, так как биохимические свойства не транслируются напрямую в органолептические; в дополнение к этому, указанная работа была выполнена на сильнощелочных почвах в узком диапазоне с pH выше 8.

Наличие положительной зависимости вкуса и цвета клубней картофеля от содержания легкоподвижного фосфора в почвах нашего опыта связано, по-видимому, с тем, что фосфатная группа входит в состав крахмала и вторичных метаболитов. Полученные нами результаты, показывающие, что кулинарные качества картофеля во многом определяются особенностями культивирования, месторасположением участков и погодными условиями, согласуются с данными ряда зарубежных авторов (Hajslova et al., 2005; Ierna et al., 2022), а также накопленным большим практическим опытом выращивания картофеля в нашей стране. Взаимосвязь же конкретных почвенных свойств с потребительской оценкой клубней, выращиваемых на агросерой почве региона, показана впервые.

Следует подчеркнуть, что в опыте мы использовали только один сорт картофеля, а именно Джелли; полученные результаты как по потребительским свойствам, так и по продукционным особенностям, относятся к этому сорту или другим среднеранним сортам картофеля с белоокрашенными клубнями, т.к. гетерогенность сортов по продукционным характеристикам растений и биохимическим свойствам клубней достаточно велика (Ierna et al., 2022; Nantongo et al., 2023); учитывая большое мировое разнообразие сортов картофеля – более 5000 (Food ..., 2023), учёт сортовой специфики имеет важное значение и в проводимых исследованиях, и в практическом растениеводстве.

ВЫВОДЫ

1. Внесение калия на фоне азотно-фосфорных удобрений (N100P60+K100) повысило урожай клубней картофеля (среднеранний сорт Джелли) на 30%, а надземной фитомассы – на 40%
2. Дополнительное внесение магния (N100P60+K100+Mg100) не оказало влияния на продукционные показатели картофеля, однако заметно повысило пищевое качество клубней.
3. Более половины дисперсии продукционных показателей картофеля связано с различием почвенно-экологических условий опытных участков. Основными почвенными свойствами, позволяющими спрогнозировать продуктивность культуры, были содержание обменного магния, аммонийного азота, а также реакция среды ($pH_{вод}$).
4. Вклад почвенно-экологических условий опытных участков в дисперсию оценок потребительских свойств клубней был весьма незначителен, но, тем не менее, статистически значим для аромата и цвета ($p \leq 0,05$) с аналогичным трендом для вкуса и рассыпчатости ($0,05 \leq p \leq 0,10$). Агрехимические свойства почв – содержание органического углерода, легкоподвижного фосфора и

нитратного азота, а также реакция среды, были определяющими в прогностической модели потребительских свойств будущего урожая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования на агросерых почвах в лесостепной зоне Западной Сибири подтвердили важность оптимизации минерального питания картофеля, в значительной степени обуславливающего урожайность и пищевкусовое качество клубней. Внесение сбалансированных доз НРК удобрений существенно повышало продуктивность выращиваемого картофеля по сравнению с использованием только NP; дополнительное к НРК внесение Mg не приводило к дальнейшему росту урожайности, однако заметно улучшало кулинарные свойства клубней.

Определённые различия в эффективности вносимых калия и магния связаны, очевидно, с неодинаковым относительным содержанием доступных форм этих элементов в исследуемых почвах (обеспеченность калием варьировала от низкой до повышенной, магнием – от средней до очень высокой), а также тем обстоятельством, что вынос (потребление) картофелем калия примерно в 20 раз превышает вынос магния. В этой связи ожидаемы результаты статистического анализа полученных экспериментальных данных, свидетельствующие о тесной зависимости продуктивности картофеля (и, в заметной степени, качества клубней) от почвенных свойств (эффективное плодородие) и погодных условий вегетационного периода (температура почвы и воздуха). Принимая во внимание тот факт, что предсказание погодных условий на среднесрочную и длительную перспективу представляется в настоящее время трудно выполнимой задачей, определение агрохимических показателей почвы перед началом вегетационного периода может реально способствовать адекватной прогностической оценке величины и качества будущего урожая.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность ведущим инженерам Института почвоведения и агрохимии СО РАН Бугровской Г.А. и Крыловой А.А. за помощь в проведении полевых и лабораторно-аналитических работ.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700309-1).

ЛИТЕРАТУРА

- Аверкина С.С., Науменко И.В. Изучение агрохимии фосфора на почвах Западной Сибири // Инновации и продовольственная безопасность. 2017. № 2 (16). С. 49–70.
- Агрохимические свойства почв и эффективность удобрений / Гамзиков Г.П., Ильин В. Б., Назарюк В.М. и др. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1989. 254 с.
- Аристархов А.Н. Агрохимическое обоснование применения магниевых удобрений // Плодородие. 2002. № 2 (5). С. 15–17.
- Артамонов С.Г., Владимиров В.П., Мостякова А.А. Формирование урожая и качество клубней среднераннего картофеля сорта Гала в зависимости от вносимых доз калийных удобрений на серой лесной почве лесостепи Среднего Поволжья // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Том 14. № 2 (53). С. 10–14. https://doi.org/10.12737/article_5d3e161e6aba99.12538029
- Верховцева Н.В., Лукьянова М.В., Кочетков И.М., Кубарев Е.Н. Оценка воздействия препаратов с физиологически активными свойствами на антиоксидантные свойства картофеля *Solanum tuberosum* L. (на примере аскорбиновой кислоты) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. Том 78. № 2. С. 56–62. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62>
- Галеев Р.Р., Ковалев Е.А., Шульга М.С. Урожайность и качество картофеля в зависимости от применения микроэлементов в северной лесостепи Новосибирского Приобья // Вестник Новосибирского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (58). С. 27–35. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-58-1-27-35>
- Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. Сорты растений. 2024. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektсионnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/dzhelli-kartofel/> (дата обращения 12.03.2024).
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

- Кириллова Г.Б., Жуков Ю.П. Влияние различных доз удобрений на урожайность и качество картофеля // *Агрохимия*. 2005. № 12. С. 31–35.
- Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Гармаев С.Р., Болонева Л.Н. Биопродуктивность и химический состав растений картофеля на аллювиальной луговой почве при применении минеральных удобрений в Забайкалье // *Агрохимия*. 2004. № 10. С. 22–26.
- Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
- Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н. Почвенно-экологическая оценка разновозрастных залежей юго-востока Западной Сибири // *Почвы и окружающая среда*. 2023. Том 6. № 4. e230. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.230>
- Практикум по агрохимии. 2-е издание, переработанное и дополненное / Под ред. академика РАСХН В.Г. Минеева. Москва: Издательство МГУ, 2001. 689 с.
- Скрябин И.А. Содержание магния в листьях и клубнях картофеля в зависимости от некорневой подкормки удобрением сульфат магния в условиях Среднего Предуралья // *Дневник науки*. 2023. №12 (84).
- Талашова А.В. Качественные характеристики урожая среднераннего картофеля при комплексном применении удобрений и орошения // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 4. С. 143–147.
- Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Наумова Н.Б. Круговорот углерода в травных экосистемах при зарастании отвалов // *Почвоведение*. 1988. № 7. С. 164–174.
- Тихомирова В.Я. Влияние свойств почв, удобрений, извести и погодных условий на обеспеченность магнием сельскохозяйственных растений // *Агрохимия*. 2011. № 5. С. 84–89.
- Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г. Удобрение картофеля. Новосибирск: СО РАН: Наука, 2019. 264 с. <https://doi.org/10.7868/978-5-02-038799-7>
- Центр Агроаналитики. В России собрали самый высокий урожай картофеля за 30 лет. Дата публикации 09.01.2024. [Электронный ресурс]. URL: <https://specagro.ru/news/202401/v-rossii-sobrali-samy-vysokiy-urozhay-kartofelya-za-30-let> (дата обращения 13.04.2024).
- Шпаар Д., Быкин А., Дрегер Д. Картофель. Минск: ЧУП «Орех», 2004. 465 с.
- Якименко В.Н. Калий в агроценозах Западной Сибири. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003. 231 с.
- Якименко В.Н. Эффективность уровня калийного питания картофеля // *Плодородие*. 2005. № 5 (26). С. 11–13.
- Якименко В.Н. Зависимость урожайности и качества картофеля от уровня калийного питания // *Плодородие*. 2017. № 4 (97). С. 6–10.
- Якименко В.Н. Взаимовлияние калия и магния при выращивании картофеля на серой лесной почве // *Агрохимия*. 2021. № 6. С. 8–15. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050136>
- Assunção N.S., Ribeiro N.P., da Silva R.M., Soratto R.P., Fernandes A.M. Tuber yield and allocation of nutrients and carbohydrates in potato plants as affected by limestone type and magnesium supply // *Journal of Plant Nutrition*. 2020. Vol. 43. No. 1. P. 51–63. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659345>
- Bak G.R., Lee K.K., Clark I.M., Mauchline T.H., Kavamura V.N., Lund G., Jee S., Lee J.T., Kim H., Lee Y.H. The potato rhizosphere microbiota correlated to the yield of three different regions in Korea // *Scientific Reports*. 2024. Vol.14. No. 1. P. 4536. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55263-7>
- Bechhoff A., Adinsi L., Ngoh Newilah G., Nakitto M., Deucher Z., Ssali R., Chijioke U., Khakasa E., Nowakunda K., Bouniol A., Dufour D., Bugaud C. Combined use of sensory methods for the selection of root, tuber and banana varieties acceptable to end-users // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12723>
- Beringer H., Haeder H.E., Lindhauer M. Water relationships and incorporation of C assimilates in tubers of potato plants differing in potassium nutrition // *Plant Physiology*. 1983. Vol. 73. No. 4. P. 956–960. <https://doi.org/10.1104/pp.73.4.956>
- Bražinskienė V., Asakaviciute R., Miezelienė A., Alencikiene G., Ivanauskas L., Jakstas V., Viskelis P., Razukas A. Effect of farming systems on the yield, quality parameters and sensory properties of conventionally and organically grown potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers // *Food Chemistry*. 2014. Vol. 145. P. 903–909. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.011>
- Chang D.C., Jin Y.K., Nam J.H., Cheon C.G., Cho, J.H., Kim S.J. Early drought effect on canopy development under growth of potato cultivars with different maturities // *Field Crops Research*. 2018. Vol. 215. P. 156–162. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.008>

- Dechassa N., Schenk M.K., Claassen N., Steingrobe B. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata), Carrot (*Daucus carota* L.), and Potato (*Solanum tuberosum* L.) // Plant and Soil. 2003. Vol. 250. P. 215–224. <https://doi.org/10.1023/A:1022804112388>
- Drapal M., De Boeck B., Kreuze H.L., Bonierbale M., Fraser P.D. Identification of metabolites associated with boiled potato sensory attributes in freshly harvested and stored potatoes // Journal of Food Composition and Analysis. 2022. Vol. 115. P. 104934. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104934>
- FAOSTAT. Data. Crops and livestock products, potatoes. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 13.04.2024).
- Food and Agriculture Organization of the United Nation. International Day of Potato. 30 May 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/international-potato-day/en> (accessed on 06.05.2024).
- Hlisnikovský L., Menšík L., Kunzová E. The Effect of Soil-Climate Conditions, Farmyard Manure and Mineral Fertilizers on Potato Yield and Soil Chemical Parameters // Plants. 2021. Vol. 16. No. 10 (11). P. 2473. <https://doi.org/10.3390/plants10112473>
- Hajslova J., Schulzova V., Slanina P., Janne K., Hellenas K. E., Andersson C. Quality of organically and conventionally grown potatoes: Four-year study of micronutrients, metals, secondary metabolites, enzymic browning and organoleptic properties // Food Additives and Contaminants. 2005. Vol. 22. No. 6. P. 514–534. <https://doi.org/10.1080/104403905000919825>
- Hopkins B.G., Horneck D.A., MacGuidwin A.E. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension // American Journal of Potato Research. 2014. Vol. 91. P.161–174. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9370-3>
- Hopkins B.G., Hansen N.C. Phosphorus Management in High-Yield Systems // Journal of environmental quality. 2019. Vol. 48. P. 1265–1280. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0130>
- Ishfaq M., Zhong Y., Wang Y., Li X. Magnesium Limitation Leads to Transcriptional Down-Tuning of Auxin Synthesis, Transport, and Signaling in the Tomato Root // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 23. No. 12. P. 802399. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.802399>
- Ierna A., Melilli M.G., Parisi B. Sensory characteristics of raw and cooked “early” potato tubers as affected by organic cultivation // Acta Hort. 2022. No. 1354. P. 375–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1354.49>
- Jansky S.H. Genotypic and Environmental Contributions to Baked Potato Flavor. American Journal of Potato Research. 2008. Vol. 85. No. 6. P. 455–465. <https://doi.org/10.1007/s12230-008-9053-z>
- Kirchgesser J., Hazarika M., Bachmann-Pfabe S., Dehmer K.J., Kavka M., Uptmoor R. Phenotypic variation of root-system architecture under high P and low P conditions in potato (*Solanum tuberosum* L.) // BMC Plant Biology. 2023. Vol. 23. No. 1. P. 68. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04070>
- Knoblauch H.C., Ödland T.E. A magnesium deficiency induced by previous fertilizer treatments // Journal of the American Society of Agronomy. 1934. Vol. 26. No. 7. P. 609–615. <https://doi.org/10.2134/agronj1934.00021962002600070010x>
- Koch L., Lehretz G.G., Sonnewald U., Sonnewald S. Yield reduction caused by elevated temperatures and high nitrogen fertilization is mitigated by SP6A overexpression in potato (*Solanum tuberosum* L.) // Plant Journal. 2024. Vol. 117. No. 6. P. 1702–1715. <https://doi.org/10.1111/tpj.16679>
- Koch M., Busse M., Naumann M., Jákli B., Smit I., Cakmak I., Hermans C., Pawelzik E. Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants // Physiologia plantarum. 2019. Vol. 166. No. 4. P. 921–935. <https://doi.org/10.1111/ppl.12846>
- Koch M., Naumann M., Pawelzik E., Gransee A., Thiel H. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield // Potato Research. 2020a. Vol. 63. P. 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
- Koch M., Winkelmann M. K., Hasler M., Pawelzik E., Naumann M. Root growth in light of changing magnesium distribution and transport between source and sink tissues in potato (*Solanum tuberosum* L.) // Scientific Reports. 2020b. Vol. 10. No. 1. P. 8796. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65896-z>
- Kreutzmann S., Bassompierre M., Thybo A.K., Buch L., Engelsens S.B. Exploratory Study of Potato Cultivar Differences in Sensory and Hedonistic Applicability Tests // Potato Research. 2011. Vol. 54. No. 1. P. 13–28. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9168-8>
- Li K., Li M., Zhou J., Guo H. The Impact of the Individual and Combined Application of Phosphorus and Sulfur Fertilizers on Potato Tuber Flavor // Foods. 2023. Vol. 12. No. 20. P. 3764. <https://doi.org/10.3390/foods12203764>

- Márton L. Fertilisation, rainfall and crop yield // Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae. 2004. Vol. 52. No. 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.1556/AAgr.52.2004.2.7>
- Nantongo J.S., Tinyiro S.E., Nakitto M., Serunkuma E., Namugga P., Ayetigbo O., Mayanja S., Moyo M., Ssali R., Mendes T. End-user preferences to enhance prospects for varietal acceptance and adoption in potato breeding in Uganda // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12882>
- Nielsen K.F., Halstead R.L., MacLean A.J., Bourget S. J., Holmes, R.M. The Influence of Soil Temperature on the Growth and Mineral Composition of Corn, Bromegrass and Potatoes // Soil Science Society of America Journal. 1961. Vol. 25. No. 5. P. 369–372. <https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500050019x>
- Osowski J., Erlichowski T., Urbanowicz J. Wpływ nawożenia potasem, magnezem i siarką na plonowanie, ciemnienie bulw surowych oraz występowanie alternariozy i ospowatości bulw ziemniaka [The effect of potassium, magnesium and sulphur fertilization on the yield, raw tuber darkening and occurrence of black scurf and early blight of potato tubers] // Fragm. Agron. 2017. Vol. 34. No. 1. P. 49–59. URL: [https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034\(1\)%202017%20Osowski.pdf](https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034(1)%202017%20Osowski.pdf) (accessed on 17.04.2024).
- Retmańska K., Pobereźny J., Wszelaczyńska E., Gościnną K., Ropińska P. Organoleptic characteristics and the total glycoalkaloid content of edible potato tubers depending on a cultivation technology and storage // Journal of Elementology. 2023. Vol. 28. No. 1. P. 7–25. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.4.2359>
- Singh B., Goutam U., Kukreja S., Sharma J., Sood S., Bhardwaj V. Potato biofortification: an effective way to fight global hidden hunger // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2021. Vol. 27. No. 10. P. 2297–2313. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01081-4>
- Tein B., Kauer K., Eremeev V., Luik A., Selge A., Loit E. Farming systems affect potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber and soil quality // Field Crops Research. 2014. Vol. 156. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.012>
- Wang Q., Li Y., Wang Y. Optimizing the weight loss-on-ignition methodology to quantify organic and carbonate carbon of sediments from diverse sources // Environmental monitoring and assessment. 2011. Vol. 174. P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1454-z>
- Wang Z., Hassan M.U., Nadeem F., Wu L., Zhang F., Li X. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis // Frontiers in Plant Sciences. 2020. Vol. 10. P. 1727. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>
- Wszelaki A.L., Delwiche J.F., Walker S.D., Liggett R.E., Scheerens J.C., Kleinhenz M.D. Sensory quality and mineral and glycoalkaloid concentrations in organically and conventionally grown redskin potatoes (*Solanum tuberosum*) // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2005. Vol. 85. No. 5. P. 720–726. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2051>
- Xu J., Li Y., Kaur L., Singh J., Zeng F. Functional Food Based on Potato // Foods. 2023. Vol. 12. No. 11. P. 2145. <https://doi.org/10.3390/foods12112145>
- Yakimenko V., Naumova N. Tuning Potassium and Magnesium Fertilization of Potato in the South of West Siberia // Agronomy. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091877>

Поступила в редакцию 22.05.2024

Принята 15.07.2024

Опубликована 15.07.2024

Сведения об авторах:

Наумова Наталья Борисовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); naumova@issa-siberia.ru

Нечаева Таисия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); nechaeva@issa-siberia.ru

Русалимова Ольга Александровна – младший научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); rusalimova@issa-siberia.ru

Савенков Олег Александрович – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); savenkov@issa-siberia.ru

Якименко Владимир Николаевич – доктор биологических наук, заведующий лабораторией агрохимии ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН (г. Новосибирск, Россия); yakimenko@issa-siberia.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Potato tuber yield and quality under potassium and magnesium addition on top of the nitrogen and phosphorus fertilization

© 2024 N.B. Naumova , T.V. Nechaeva , O.A. Rusalimova , O.A. Savenkov , V.N. Yakimenko 

Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lavrentieva, 8/2, Novosibirsk, Russia. E-mail: naumova@issa-siberia.ru

The aim of the study to investigate the effect of individual or combined K and Mg addition on potato tuber yield and quality along the gradient of soil and environmental conditions, which was formed by the five experimental plots in the forest-steppe one of West Siberia.

Location and time of the study. Microplot field experiment with moderately early potato cultivar Jelly with three fertilization treatments (N100P60, N100P60+K100 and N100P60+K100+Mg100) was setup in five replicates on five experimental plots with agricultural grey soils in the Novosibirsk Region in 2023. Geographical coordinates of the experimental sites varied from 55°15'40" to 54°47'09" NL and from 83°31'42" to 82°37'56" EL.

Methods. Instead of traditional temporal gradient (3–4 years of the experiment at a site) to account for weather variation, with the same purpose we used a spatial gradient, which in addition allowed to assess the effect of soil properties variation among the sites. Soil samples, collected prior to the experiment, were analyzed for organic carbon content, nitrate and ammonium nitrogen, exchangeable phosphorous, potassium and magnesium, as well as soil pH and electrical conductivity. In the course of the experiment air and soil (at 5 and 15 cm depth) temperatures was automatically recorded. At the end of the experiment potato tuber mass and number, as well as the aboveground phytomass, were measured at each microplot. After five months of tuber storage sensory properties (flavour, aroma, colour, mealiness and friability) of boiled tubers were assessed using a Hedonic scale. Analysis of variance, principal components extraction and multiple regression by partial least squares method were performed using Statistica v. 13.1. software.

Results. Addition of K at the background NP fertilization (N100P60+K100 treatment) increased tuber yield by 30% and the aboveground phytomass by 40%. Addition of Mg (N100P60+K100+Mg100) did not affect yield properties, but markedly improved potato culinary quality. More than half of the variance of the potato yield properties was accounted for by the variation in soil and environmental conditions of the experimental fields location. Exchangeable Mg, ammonium N and soil pH were the main soil properties, allowing to forecast the current year tuber yield. The contribution of soil and environmental conditions of the experimental fields into the variance of the sensory properties, albeit small, was statistically significant ($p \leq 0,05$) for aroma and colour, with the similar trend for flavour and friability ($0,05 \leq p \leq 0,10$). Agrochemical properties, i.e. soil organic carbon, readily exchangeable P and nitrate N contents, as well as soil pH, were the main variables, determining tuber quality for consumers.

Conclusions. The study performed on the agricultural grey soil in the forest-steppe zone of West Siberia confirmed the importance of optimizing potato mineral nutrition. Addition of NPK at the balanced rates significantly increased potato yield as compared with NP. Although addition of MG together with NPK did not increase the yield, it markedly improved sensory properties of potato. Some soil properties and temperature conditions, found to determine the yield (effective soil fertility), can be used in prognostic models for potato tuber yields and quality.

Keywords: West Siberia; agricultural grey soil; mineral fertilizers; potato; tuber sensory properties; soil and environmental factors.

How to cite: Naumova N.V., Nechaeva T.V., Rusalimova O.A., Savenkov O.A., Yakimenko V.N. Potato tuber yield and quality under potassium and magnesium addition on top of the nitrogen and phosphorus fertilization. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(2). e268. DOI: [10.31251/pos.v7i2.268](https://doi.org/10.31251/pos.v7i2.268). (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are very thankful to Galina Bugrovskaya and Anastasiya Krylova, both Leading Engineers in the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS for helping with the field work and carrying out laboratory analyses.

FUNDING

The study was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031700309-1).

REFERENCES

- Averkina S.S., Naumenko I.V. History of the study of agricultural chemistry of phosphorus in soils of Western Siberia. *Innovations and Food Safety*. 2017. No. 2 (16). P. 49–70. (in Russian).
- Agrochemical properties of soils and efficiency of fertilizers / Gamzikov G.P., Ilyin V.B., Nazariuk V.M. et al. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 1989. 254 p. (in Russian).
- Aristarkhov A.N. Agrochemical justification for the use of magnesium fertilizers. *Plodorodie*. 2002. No. 2 (5). P. 15–17. (in Russian).
- Artamonov S., Vladimirov V., Mostyakova A. Formation of the harvest and quality of average-early potato tubers of Gala variety, depending on the included doses of potassium fertilizers on the gray forest soil of forest-steppe of the Middle Volga region. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. No. 2 (53). P. 10–14. (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5d3e161e6aba99.12538029
- Verkhovtseva N.V., Lukyanova M.V., Kochetkov I.M., Kubarev E.N. Evaluation of the effect of drugs with physiologically active properties on the antioxidant properties of potato *Solanum tuberosum* L. (using ascorbic acid as an example). *Lomonosov Soil Science Journal*. 2023. Vol. 78. No. 2. P. 56–62. (in Russian). <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-56-62>
- Voloshin E.I. Influence of potassium fertilizers on potato productivity on chernozem Krasnoyarsk forest steppe. *Bulletin of Krasnoyarsk Agrarian University*. 2006. No. 11. P. 80–85. (in Russian).
- Galeev R.R., Kovalev E.A., Shulga M.S. Yield and quality of potatoes depending on the application of microelements in the northern forest-steppe Ob in Novosibirsk. *Bulletin of Novosibirsk State Agrarian University*. 2021. No. 1 (58). P. 27–35. (in Russian). <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-58-1-27-35>
- State register of breeding achievements approved for use. Vol. 1. Plant varieties. 2024. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-seleksionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/dzhelli-kartofel/> (accessed on 12.03.2024). (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kirillova G.B., Zhukov Yu.O. Effect of calculated fertilizer rates on potato yield and quality. *Agrokhimia*. 2005. No. 12. P. 31–35. (in Russian).
- Merkusheva M.G., Ubugunov L.L., Garmaev S.R., Boloneva L.N. The Bioproductivity and chemical composition of potato plants on alluvial meadow soil under mineral fertilization in the Transbaikalia. *Agrokhimia*. 2004. No. 10. P. 22–26. (in Russian).
- Methodological guidelines for comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands. Moscow: "Rosinformagroteh", 2003. 240 p. (in Russian).
- Miller G.F., Solovyev S.V., Bezborodova A.N. Soil-ecological assessment of soils of abandoned lands of diggerent age in the southeast of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 4. e230. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.230>
- Workshop on agrochemistry. 2nd edition, revised and supplemented / V.G. Mineev (ed.). Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2001. 689 p. (in Russian).
- Scriabin I.A. Magnesium content in potato leaves and tubers depending on foliar fertilization with magnesium sulfate fertilizer in the conditions of the Middle Urals. *Dnevnik Nauki*. 2023. No. 12 (84). (in Russian).
- Talashova A.V. Qualitative characteristics of medium-early potato yield at complex application of fertilizers and irrigation. *Vestnik of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2019. No. 4. P. 143–147. (in Russian).
- Titlyanova A.A., Mironycheva-tokareva N.P., Naumova N.B. Carbon cycle in the developing grass ecosystems of earth excavation. *Pochvovedenie*. 1988. No. 7. P. 164–174. (in Russian).

Tikhomirova V.Ya. Effect of soil environment, mineral fertilizers, potassium, weather conditions on the magnesium supply of agricultural crops. *Agrokhimia*. 2011. No. 5. P. 84–89. (in Russian).

Ubugunov L.L., Merkusheva M.G. Fertilization of potatoes. Novosibirsk: Nauka Publ., Siberian Branch, 2019. 264 p. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/978-5-02-038799-7>

Agroanalytics Center. Russia has harvested the highest potato crop in 30 years. Publication date 09.01.2024. [Electronic resource]. URL: <https://specagro.ru/news/202401/v-rossii-sobrali-samyi-vysokiy-urozhay-kartofelya-za-30-let> (accessed on 13.04.2024).

Shpaar D., Bykin A., Dreger D. Potatoes. Minsk: "Orekh", 2004. 465 p. (in Russian).

Yakimenko V.N. Potassium in agrocenoses of Western Siberia. Novosibirsk: Published by Siberian Branch of RAS, 2003. 231 p. (in Russian).

Yakimenko V.N. Efficiency of potassium nutrition level of potatoes. *Plodorodie*. 2005. No. 5 (26). P. 11–13. (in Russian).

Yakimenko V.N. Effect of potassium nutrition on the yield and quality of potatoes. *Plodorodie*. 2017. No. 4 (97). P. 6–10. (in Russian).

Yakimenko V.N. Interaction of potassium and magnesium in cultivation of potatoes on gray forest soil. *Agrokhimia*. 2021. No. 6. P. 8–15. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188121050136>

Assunção N.S., Ribeiro N.P., da Silva R.M., Soratto R.P., Fernandes A.M. Tuber yield and allocation of nutrients and carbohydrates in potato plants as affected by limestone type and magnesium supply. *Journal of Plant Nutrition*. 2020. Vol. 43. No. 1. P. 51–63. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659345>

Bak G.R., Lee K.K., Clark I.M., Mauchline T.H., Kavamura V.N., Lund G., Jee S., Lee J.T., Kim H., Lee Y.H. The potato rhizosphere microbiota correlated to the yield of three different regions in Korea. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No. 1. P. 4536. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55263-7>

Bechoff A., Adinsi L., Ngoh Newilah G., Nakitto M., Deucher Z., Ssali R., Chijioke U., Khakasa E., Nowakunda K., Bouniol A., Dufour D., Bugaud C. Combined use of sensory methods for the selection of root, tuber and banana varieties acceptable to end-users. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12723>

Beringer H., Haeder H.E., Lindhauer M. Water relationships and incorporation of C assimilates in tubers of potato plants differing in potassium nutrition. *Plant Physiology*. 1983. Vol. 73. No. 4. P. 956–960. <https://doi.org/10.1104/pp.73.4.956>

Bražinskienė V., Asakaviciute R., Miezelienė A., Alencikiene G., Ivanauskas L., Jakstas V., Viskelis P., Razukas A. Effect of farming systems on the yield, quality parameters and sensory properties of conventionally and organically grown potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Food Chemistry*. 2014. Vol. 145. P. 903–909. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.011>

Chang D.C., Jin Y.K., Nam J.H., Cheon C.G., Cho, J.H., Kim S.J. Early drought effect on canopy development under growth of potato cultivars with different maturities. *Field Crops Research*. 2018. Vol. 215. P. 156–162. <https://doi.org/doi/10.1016/j.fcr.2017.10.008>

Dechassa N., Schenk M.K., Claassen N., Steingrobe B. Phosphorus efficiency of cabbage (*Brassica oleraceae* L. var. capitata), Carrot (*Daucus carota* L.), and Potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant and Soil*. 2003. Vol. 250. P. 215–224. <https://doi.org/10.1023/A:1022804112388>

Drapal M., De Boeck B., Kreuze H.L., Bonierbale M., Fraser P.D. Identification of metabolites associated with boiled potato sensory attributes in freshly harvested and stored potatoes. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2022. Vol. 115. P. 104934. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104934>

FAOSTAT. Data. Crops and livestock products, potatoes. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2024. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 13.04.2024).

Food and Agriculture Organization of the United Nation. International Day of Potato. 30 May 2023. [Electronic resource]. URL: <https://www.fao.org/international-potato-day/en> (accessed on 06.05.2024).

Hlišnikovský L., Menšík L., Kunzová E. The Effect of Soil-Climate Conditions, Farmyard Manure and Mineral Fertilizers on Potato Yield and Soil Chemical Parameters. *Plants*. 2021. Vol. 16. No. 10 (11). P. 2473. <https://doi.org/10.3390/plants10112473>

Hajslova J., Schulzova V., Slanina P., Janne K., Hellenas K. E., Andersson C. Quality of organically and conventionally grown potatoes: Four-year study of micronutrients, metals, secondary metabolites, enzymic browning and organoleptic properties. *Food Additives and Contaminants*. 2005. Vol. 22. No. 6. P. 514–534. <https://doi.org/16019825>

- Hopkins B.G., Horneck D.A., MacGuidwin A.E. Improving phosphorus use efficiency through potato rhizosphere modification and extension. *American Journal of Potato Research*. 2014. Vol. 91. P.161–174. <https://doi.org/10.1007/s12230-014-9370-3>
- Hopkins B.G., Hansen N.C. Phosphorus Management in High-Yield Systems. *Journal of environmental quality*. 2019. Vol. 48. P. 1265–1280. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0130>
- Ishfaq M., Zhong Y., Wang Y., Li X. Magnesium Limitation Leads to Transcriptional Down-Tuning of Auxin Synthesis, Transport, and Signaling in the Tomato Root. *Frontiers in Plant Science*. 2021. Vol. 23. No. 12. P. 802399. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.802399>
- Ierna A., Melilli M.G., Parisi B. Sensory characteristics of raw and cooked “early” potato tubers as affected by organic cultivation. *Acta Horti*. 2022. No. 1354. P. 375–382. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1354.49>
- Kirchgesser J., Hazarika M., Bachmann-Pfabe S., Dehmer K.J., Kavka M., Uptmoor R. Phenotypic variation of root-system architecture under high P and low P conditions in potato (*Solanum tuberosum* L.). *BMC Plant Biology*. 2023. Vol. 23. No. 1. P. 68. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04070>
- Knoblauch H.C., Ödland T.E. A magnesium deficiency induced by previous fertilizer treatments. *Journal of the American Society of Agronomy*. 1934. Vol. 26. No. 7. P. 609–615. <https://doi.org/10.2134/agronj1934.00021962002600070010x>
- Koch L., Lehretz G.G., Sonnewald U., Sonnewald S. Yield reduction caused by elevated temperatures and high nitrogen fertilization is mitigated by SP6A overexpression in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Journal*. 2024. Vol. 117. No. 6. P. 1702–1715. <https://doi.org/10.1111/tpj.16679>
- Koch M., Busse M., Naumann M., Jákli B., Smit I., Cakmak I., Hermans C., Pawelzik E. Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiologia plantarum*. 2019. Vol. 166. No. 4. P. 921–935. <https://doi.org/10.1111/ppl.12846>
- Koch M., Naumann M., Pawelzik E., Gransee A., Thiel H. The Importance of Nutrient Management for Potato Production Part I: Plant Nutrition and Yield. *Potato Research*. 2020a. Vol. 63. P. 97–119. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
- Koch M., Winkelmann M. K., Hasler M., Pawelzik E., Naumann M. Root growth in light of changing magnesium distribution and transport between source and sink tissues in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Scientific Reports*. 2020b. Vol. 10. No. 1. P. 8796. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65896-z>
- Kreutzmann S., Bassompierre M., Thybo A.K., Buch L., Engelsens S.B. Exploratory Study of Potato Cultivar Differences in Sensory and Hedonistic Applicability Tests. *Potato Research*. 2011. Vol. 54. No. 1. P. 13–28. <https://doi.org/10.1007/s11540-010-9168-8>
- Li K., Li M., Zhou J., Guo H. The Impact of the Individual and Combined Application of Phosphorus and Sulfur Fertilizers on Potato Tuber Flavor. *Foods*. 2023. Vol. 12. No. 20. P. 3764. <https://doi.org/10.3390/foods12203764>
- Márton L. Fertilisation, rainfall and crop yield. *Acta Agronomica Academiae Scientiarum Hungaricae*. 2004. Vol. 52. No. 2. P. 165–172. <https://doi.org/10.1556/AAgr.52.2004.2.7>
- Nantongo J.S., Tinyiro S.E., Nakitto M., Serunkuma E., Namugga P., Ayetigbo O., Mayanja S., Moyo M., Ssali R., Mendes T. End-user preferences to enhance prospects for varietal acceptance and adoption in potato breeding in Uganda. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12882>
- Nielsen K.F., Halstead R.L., MacLean A.J., Bourget S. J., Holmes, R.M. The Influence of Soil Temperature on the Growth and Mineral Composition of Corn, Bromegrass and Potatoes. *Soil Science Society of America Journal*. 1961. Vol. 25. No. 5. P. 369–372. <https://doi.org/10.2136/sssaj1961.03615995002500050019x>
- Oowski J., Erlichowski T., Urbanowicz J. Wpływ nawożenia potasem, magnezem i siarką na plonowanie, ciemnienie bulw surowych oraz występowanie alternariozy i ospowatości bulw ziemniaka [The effect of potassium, magnesium and sulphur fertilization on the yield, raw tuber darkening and occurrence of black scurf and early blight of potato tubers]. *Fragm. Agron.* 2017. Vol. 34. No. 1. P. 49–59. URL: [https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034\(1\)%202017%20Oowski.pdf](https://pta.up.poznan.pl/pdf/2017/FA%2034(1)%202017%20Oowski.pdf) (accessed on 17.04.2024). (in Polish).
- Retmańska K., Pobereźny J., Wszelaczyńska E., Gościnną K., Ropińska P. Organoleptic characteristics and the total glycoalkaloid content of edible potato tubers depending on a cultivation technology and storage. *Journal of Elementology*. 2023. Vol. 28. No. 1. P. 7–25. <https://doi.org/10.5601/jelem.2022.27.4.2359>
- Singh B., Goutam U., Kukreja S., Sharma J., Sood S., Bhardwaj V. Potato biofortification: an effective way to fight global hidden hunger. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2021. Vol. 27. No. 10. P. 2297–2313. <https://doi.org/10.1007/s12298-021-01081-4>
- Tein B., Kauer K., Ereemeev V., Luik A., Selge A., Loit E. Farming systems affect potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber and soil quality. *Field Crops Research*. 2014. Vol. 156. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.012>

Wang Q., Li Y., Wang Y. Optimizing the weight loss-on-ignition methodology to quantify organic and carbonate carbon of sediments from diverse sources. *Environmental monitoring and assessment*. 2011. Vol. 174. P. 241–257. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1454-z>

Wang Z., Hassan M.U., Nadeem F., Wu L., Zhang F., Li X. Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 1727. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01727>

Wszelaki A.L., Delwiche J.F., Walker S.D., Liggett R.E., Scheerens J.C., Kleinhenz M.D. Sensory quality and mineral and glycoalkaloid concentrations in organically and conventionally grown redskin potatoes (*Solanum tuberosum*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2005. Vol. 85. No. 5. P. 720–726. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2051>

Xu J., Li Y., Kaur L., Singh J., Zeng F. Functional Food Based on Potato. *Foods*. 2023. Vol. 12. No. 11. P. 2145. <https://doi.org/10.3390/foods12112145>

Yakimenko V., Naumova N. Tuning Potassium and Magnesium Fertilization of Potato in the South of West Siberia. *Agronomy*. 2021. Vol. 11. No. 9. P. 1877. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091877>

Received 22 May 2024

Accepted 15 July 2024

Published 15 July 2024

About the authors:

Natalia B. Naumova – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); naumova@issa-siberia.ru

Taisia V. Nechaeva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); nechaeva@issa-siberia.ru

Olga A. Rusalimova – Junior Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); rusalimova@issa-siberia.ru

Oleg A. Savenkov – Candidate of Biological Sciences, Researcher in the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); savenkov@issa-siberia.ru

Vladimir N. Yakimenko – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Agrochemistry in the Institute of Soil Science and Agrochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russia); yakimenko@issa-siberia.ru

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)