



Закономерности влияния густоты посева озимой пшеницы на ее урожайность

М. Е. Чаплыгин , Э. В. Жалнин, Л. С. Шибряева,
А. В. Подзоров
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)
 misha2728@yandex.ru

Аннотация

Введение. В статье рассматриваются морфологические особенности почвы и сортовые особенности зерна как главные факторы, от которых зависит динамика прорастания озимой пшеницы от проростков до созревания зерна.

Цель статьи. Установление основных закономерностей развития растений в зависимости от внутренних и внешних факторов, влияющих на урожайность озимой пшеницы.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была взята озимая пшеница сорта РС-1 «Таня». Посев производили на производственных площадях Северо-Кавказского федерального округа. Размер площади составил 70 га, было заложено 2 опыта с разной нормой высева. Достоверность результатов проверялась по коэффициенту Фишера и Стьюдента. Наблюдения проводили за полным циклом роста растений – от проростков до полного созревания зерна.

Результаты исследования. Сопоставлена динамика изменения морфологических параметров растений, проросших из семян при разных нормах высева 2,6 и 6,5 млн шт/га. Проведен анализ роли внешних и внутренних факторов, определяющих зависимость урожайности пшеницы от нормы высева семян. К внешним относили факторы среды роста, определяющие жизнеспособность растений и связывающие ее с плотностью посева. При этом были рассмотрены физико-химические свойства почвы, включая ее плодородие с показателями емкости (количество минеральных веществ и их фракционный состав), прочность связи минеральных веществ с твердой фазой почвы и скорость перехода почвенных ионов из твердой фазы в водный раствор. При исследовании почвы, подготовленной по предлагаемой технологии возделывания, было установлено, что при норме высева 6,5 млн шт/га количество продуктивных стеблей составило 550 шт. (0,0575 ед/кг стеблей), в то время как на площади при норме высева 2,6 млн шт/га количество таких стеблей составило 575 шт. (0,183 ед/кг стеблей).

Обсуждение и заключение. Проведена оценка влияния плотности высева семян пшеницы на урожайность с использованием уравнения Гарднера и параметров сорбционных свойств корневых систем пшеницы. Показано, что для плотности посева пшеницы при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га соотношение между значениями коэффициентов диффузии $D(6,5)/D(2,6)$, полученными с учетом выросших стеблей, составило ~1,7 раза. Было показано, что определяющим фактором является структура почвы, которая определяет параметры водопроводности. Вид формирующейся корневой системы определяется скоростью поглощения воды и глубиной, с которой вода извлекается из почвы в расчете на одно растение. К факторам, определяющим влияние плотности посева на урожайность, относятся осмотические параметры мембран в клетках семян. Накопление в клетке пролина как осмотически активного органического вещества способствует удержанию в ней воды. Обработка

© Чаплыгин М. Е., Жалнин Э. В., Шибряева Л. С., Подзоров А. В., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

микроэлементами и регуляторами роста семян, проросших при разных нормах высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, приводит к большему росту концентрации пролина в цитоплазме в первом случае, чем во втором.

Ключевые слова: озимая пшеница, норма высева, корневая система озимой пшеницы, факторы урожайности пшеницы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств гранта по соглашению № 075-15-2022-1210 от 07.10.2022 с Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта по теме «Разработка технологии и оборудования для улучшения продуктивных свойств семян зерновых культур путем электромагнитного воздействия».

Для цитирования: Закономерности влияния густоты посева озимой пшеницы на ее урожайность / М. Е. Чаплыгин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 490–507. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.490-507>

Original article

Patterns of Influence of Winter Wheat Sowing Density on Its Yield

M. E. Chaplygin , E. V. Zhalnin, L. S. Shibryaeva, A. V. Podzorov

*Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)*

 misha2728@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article deals with the soil morphological features and grain varietal characteristics as the main factors on which the dynamics of the winter wheat development from seedlings to full grain ripeness depends.

Aim of the Article. The article is aimed at determining the main patterns of plant development depending on internal and external factors affecting the winter wheat yield.

Materials and Methods. The winter wheat variety RS-1 “Tanya” was an object of the research. Sowing was carried out in the production zones of the North Caucasus Federal District. The size of the area amounted to 70 ha; there were two experiments with different seeding rates. The reliability of the results was checked using Fisher's and Student's coefficient. There were carried out monitoring of the complete cycle of plant development - from seedlings to full grain ripeness.

Results. The dynamics of changes in morphological parameters of plants germinated from seeds at seeding rates of 2.6 and 6.5 million pieces/ha was compared. The role of external and internal factors determining the dependence of wheat yield on seeding rate was analyzed. The external factors included the growth environment factors determining the health of plants and relating growth environment to the sowing density. At the same time, there were considered physico-chemical properties of soil including its fertility with capacity index (the amount of mineral substances and their fractional composition), the strength of the bond between mineral substances and the matrix soil, and the rate of transition of soil ions from the matrix soil to aqueous solution. When analyzing the soil prepared by the proposed cultivation technology, it was found that at a seeding rate of 6.5 million pieces/ha the number of productive stems was 550 pieces (0.0575 pieces/kg of stems), and at a seeding rate of 2.6 million pieces/ha their number was 575 pieces (0.183 pieces/kg of stems).

Discussion and Conclusion. The influence of wheat seed sowing density on yield was evaluated using the Gardner equation and parameters of sorption properties of wheat root systems. It was shown that for wheat sowing density at seeding rates of 2.6 and 6.5 million pieces/ha the ratio between the values of diffusion coefficients $D(6.5)/D(2.6)$, obtained taking into account the grown stems, was ~ 1.7 times. It was found that the determining

factor is the soil structure, on which the parameters of water supply depend. The type of developing root system is determined by the water absorption rate and the depth to which water is extracted from the soil per plant. The factors determining the effect of seeding density on yield include osmotic parameters of seed cell membranes. Accumulation of proline as an osmotically active organic matter in the cell promotes water retention in the cell. The use of microelements and growth regulators for treating seeds germinated at sowing rates of 2.6 and 6.5 million pieces/ha leads to a greater increase in the proline concentration in the cytoplasm in the first case than in the second.

Keywords: winter wheat, seeding rate, winter wheat root system, wheat yield factors

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

Funding: The work was supported by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: Agreement No. 075-15-2022-1210 of October 7, 2022 "Development of technology and equipment for improving the productive properties of grain seeds by electromagnetic influence".

For citation: Chaplygin M.E., Zhalnin E.V., Shibryaeva L.S., Podzorov A.V. Patterns of Influence of Winter Wheat Sowing Density on Its Yield. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):490–507. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.490-507>

Введение

Важнейшей стратегической задачей в области агропромышленного комплекса является поиск новых инновационных технологий, направленных на улучшение качества выращиваемых культур и повышение урожайности. Эта задача требует использования научных подходов для разработки новых методов улучшения условий развития растений [1–4]. В настоящее время основным резервом, позволяющим решить проблему повышения урожайности сельскохозяйственных культур, является использование адаптивных агротехнологий, обеспечивающих взаимосвязанное решение следующих вопросов: размещение посевов¹ [4], использование высокопродуктивных районированных сортов [3], своевременное и качественное внедрение всех технологических приемов, основанных на комплексной механизации производства и рациональной организации труда [4; 5].

Обзор литературы

Предпосылки для использования принятой технологии появились в результате исследований, проведенных в последние годы [3; 6]. За это время сорта, их урожайность и даже климатические условия значительно изменились как в Российской Федерации, так и за границей [7–9]. Прежде всего, были получены достоверные результаты, свидетельствующие о возможности изменения нормы высева зерновых культур без ущерба для урожайности [10–14]. Было продемонстрировано, что разумное и рациональное снижение нормы высева семян может повысить эффективность возделывания сельскохозяйственных культур благодаря снижению затрат на посадочный материал и ряду факторов, способствующих повышению урожайности. Например, за счет увеличения размеров корневой системы, уменьшения полегания растений, улучшения фитосанитарного состояния сельскохозяйственных культур и т. д. [10–14]. Результаты исследований по возделыванию зерновых культур, проведенных во многих странах Западной Европы, в Беларуси, Казахстане, Киргизии, Бурятии, Российской Федерации подтверждают, что важной проблемой является определение взаимосвязи между урожайностью и технологией высадки семян

¹ Чекмарев П. А., Васенев И. И., Гогмачадзе Г. Д. Агроэкологическая оценка земель и оптимизация землепользования. М. : Издательство Московского университета, 2012. 268 с.

в почву [10–12]. Важным вопросом является взаимосвязь между технологическими приемами посадки культур и их сортовыми качествами. На первое место выдвигается вопрос индивидуальной продуктивности каждого растения в зависимости от вида, сорта, нормы высева, при этом рассматривается критическое расстояние между растениями в ряду в зависимости от состояния почвы [10–14]. Однако для научного подхода к внедрению технологии, определяющей возможность повышения урожайности сельскохозяйственных культур, основанной на варьировании нормы высева, требуется установить факторы роста, заложенные в сортовых особенностях и в строении растения [14–15].

Материалы и методы

Эксперименты проводились на производственных посевных площадях Северо-Кавказского округа на посевах озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня».

На поле после уборки предшественника кукурузы на зерно площадью 70 га была подготовлена почва для посева озимой пшеницы по следующей технологии:

- дискование в два прохода агрегата МТЗ-1523 + БДМ-4х2 «Кортес 4»;
- внесение основного удобрения Аммофос 150 кг/га МТЗ-82 + ЗА-М-900;
- закрытие удобрений МТЗ-1221 + БДТМ-3П-3А;
- предпосевная обработка почвы МТЗ-1221 + КП-8;
- посев МТЗ-82 + СЗТ – 5,4 и МТЗ-82 + С-6ПМ («быстрица»);
- прикатывание посевов МТЗ-82 + ЗККШ-6.

Агрохимический анализ обеспеченности почвы опытных участков элементами питания проведен согласно методике, изложенной в «Общесоюзной инструкции по крупномасштабным почвенным и агрохимическим исследованиям». Каждый смешанный образец составлен из 20 индивидуальных проб, отобранных буром с 10 га участка прямым маршрутным способом на глубину пахотного слоя (0–30 см). Анализы почвенных проб выполнены следующими методами:

- гумус – по методу Тюрина, по ГОСТ 26213;
- подвижный фосфор и обменный калий – по методу Мачигина согласно ГОСТ 26205;
- нитрификационная способность почв – по методу Кравкова согласно ГОСТ 26951;
- кислотность почвы pH (КН1) согласно ГОСТ 26483;
- подвижная сера по методу ЦИНАО согласно ГОСТ 26490;
- подвижный марганец, цинк, кобальт и медь – согласно ГОСТ Р 50685, ГОСТ Р 50686, ГОСТ Р 50683;
- тяжелые металлы – в соответствии с рассмотренным методом²;
- остаточные количества пестицидов – по методу, описанному в работе М. А. Клисенко³.

Агрохимическую характеристику почв опытного поля проводили по следующим показателям: содержание гумуса, нитрифицирующая способность почв, подвижные формы фосфора, калия, микроэлементов, тяжелых металлов и реакция почвенного раствора (табл. 1).

Результаты исследования

С целью анализа внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на урожайность, использовали посадки с различной густотой посева озимой пшеницы. Для этого на поле площадью 40 га был проведен посев озимой пшеницы сорта

² Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодия и продукция растениеводства / Под ред. А. М. Артюшина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. : ЦИНАО, 1992. 63 с.

³ Клисенко М. А. Методы определения микроколичеств пестицидов в почве, продуктах питания и внешней среде. М. : Колос, 1992. 304 с.

РС-1 «Таня» с нормой высева 6,5 млн шт/га, на другом участке площадью 30 га был проведен посев с уменьшенной нормой высева 2,6 млн шт/га.

Влияние разной нормы высева было исследовано в условиях подготовки агрохимических характеристик оптимальных для роста растений почв.

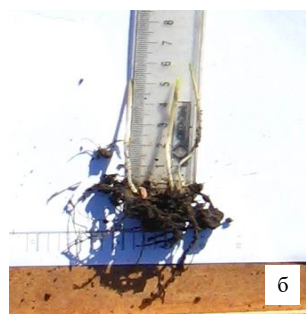
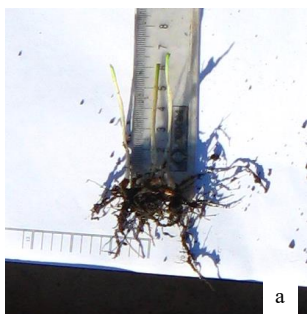
Агрохимическую характеристику почв опытного поля проводили по следующим показателям: содержание гумуса, нитрифицирующая способность почв, подвижные формы фосфора и калия, микроэлементы, тяжелые металлы и реакция почвенного раствора (табл. 1). Из агрохимических характеристик почв опытного поля, составленных на основе данных анализа почвы, видно, что почва опытного участка имеет среднее содержание гумуса, повышенную и высокую способность к нитрификации, очень низкое содержание фосфора и большое содержание калия. Реакция почвы рН-нейтральная. Запасы серы, марганца, цинка и меди невелики. Содержание тяжелых металлов не превышает предельно допустимой концентрации (ПДК). Наблюдение за прорастанием растений показало (рис. 1), что начало кущения на участке с нормой высева 2,6 млн шт/га произошло на 2 недели раньше, чем на участке с нормой высева 6,5 млн шт/га.



Р и с. 1. Посевы озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 1. Winter wheat crops of the “Tanya” RS-1 variety with the seeding rate 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

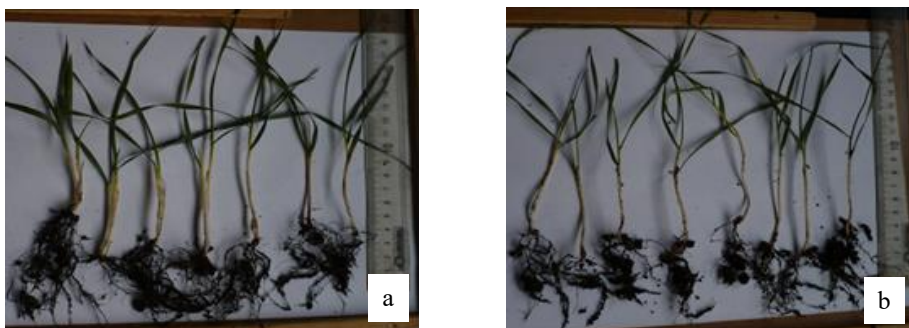
Корневая система озимой пшеницы была волокнистой и при норме высева 2,6 млн шт/га стала более мощной и развитой (рис. 2).



Р и с. 2. Состояние корневой системы растений озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 2. The condition of the root system of winter wheat plants of the “Tanya” RS-1 variety with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

При этом растения имели заметно более толстый стебель и более крупные листья (рис. 3).



Р и с. 3. Состояние корневой системы растений озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» перед фазой зимнего роста с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 3. Condition of the root system of winter wheat plants of the “Tanya” RS-1 variety before the winter growth phase with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

Таким образом, на зиму растения уходят с хорошо развитой корневой системой. В то же время на площади с нормой высева 2,6 млн шт/га всходы пшеницы находились в начале кущения. Растения хорошо перезимовали (рис. 4).

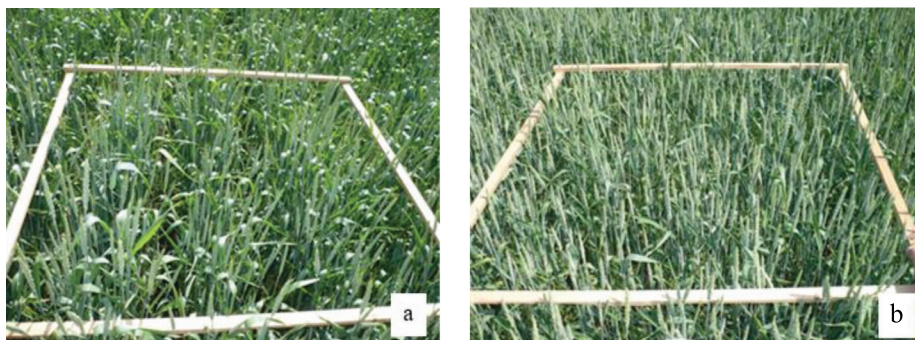


Р и с. 4. Состояние корневой системы растений озимой пшеницы сорта РС-1 «Таня» весной с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 4. Condition of the root system of winter wheat plants of the “Tanya” RS-1 variety in spring with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

В начале марта была проведена первая подкормка аммиачной селитрой из расчета 150 кг/га. Через три недели была проведена вторая подкормка аммиачной селитрой из расчета 100 кг/га. В начале апреля для борьбы с сорняками и болезнями посевы были обработаны препаратами Турбо (0,1 л/га) и Зим-500 (0,6 л/га) соответственно. Также была проведена внекорневая подкормка гуматом калия (0,5 л/га).

Проведенными исследованиями было установлено, что при низких нормах высева озимая пшеница интенсивно кустится. На загущенных посевах в результате недостаточного освещения на заключительных стадиях органогенеза отмирает значительная часть побегов и целых растений, а у тех, которые сохраняются, развитие несколько задерживается (рис. 5).



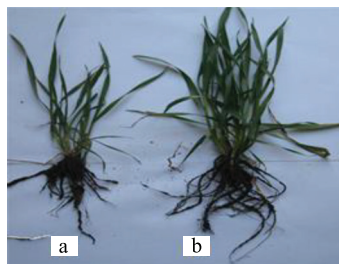
Р и с. 5. Состояние посевов озимой пшеницы РС-1 «Таня» с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 5. Condition of winter wheat crops of the “Tanya” RS-1 variety with a sowing rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

Недостаток света является основной причиной низкого коэффициента продуктивного кушения культур с высокой нормой высева. При его отсутствии наблюдается углеводное голодание растений, задерживается образование новых побегов, и в то же время тормозится регенерация узловых корней, от степени развития которых, в свою очередь, зависит энергия кушения. Наблюдениями доказано, что побеги, которые своевременно не образуют корней, рано отмирают. Лабораторные исследования показали, что продуктивными являются те побеги, которые синхронно формируются осенью и не повреждаются зимой.

Всходы, которые появляются позже, представляют собой выжимку, образующую в колосе несколько недоразвитых зерен, либо выжимку, неспособную образовывать колосья. Для нормального роста и развития растениям озимой пшеницы требуется соответствующая зона подкормки, в которой они могут получать достаточное количество влаги и питательных веществ, чтобы реализовать свою потенциальную продуктивность.

Была установлена ведущая роль процесса формирования корневой системы. Там, где норма высева составляла 2,6 млн шт/га, корневая система была более развитой, корни расходились во всех направлениях вниз и обеспечивали достаточное питание растений. При плотности посева 6,5 млн шт/га происходила внутривидовая борьба за водоснабжение, при этом корневая система была менее развитая, корни в основном росли вниз (рис. 6).



Р и с. 6. Корневая система пшеницы РС-1 «Таня», выращенной из посадок с нормой высева 2,6 (а) и 6,5 млн шт/га (b)

F i g. 6. The root system of “Tanya” RS-1 variety, grown from plantings with a seeding rate of 2.6 (a) and 6.5 million units/ha (b)

При более низких нормах высева увеличение урожайности обычно объясняется уменьшением полегания и внутривидовой борьбы между растениями, увеличением размеров корневой системы, полевой всхожести, зимостойкости и выживаемости, улучшением индивидуального развития каждого растения и фитосанитарного состояния посевов. Однако эти концепции основаны на определенных механизмах биологической адаптации пшеницы и факторах, с помощью которых нормы высева могут контролировать развитие растений и, следовательно, их урожайность.

Можно выделить несколько групп биологических факторов, которые связывают рост и развитие растений с плотностью высева их семян.

Очевидно, что в первую очередь это факторы окружающей среды: качество почвы, в которой прорастают семена, содержание минеральных веществ, водный режим, активность фотосинтетического аппарата. Условно эти факторы можно отнести к факторам внешней среды. С другой стороны, это набор биологических адаптаций, присущих семенам сельскохозяйственных культур под влиянием условий развития, которые складываются в эколого-ценотическую стратегию вида, позволяющую ему адаптироваться к этим условиям. Это внутренние факторы, которые обусловлены специфическими характеристиками растения. Среди физиологических процессов, определяющих развитие и выживание растений в любых условиях, стоит отметить поглощение воды и растворимых в ней минералов. Более того, развитие растений в гораздо большей степени зависит от водного обмена растений, наличия воды, которая определяет водный режим растительных клеток и растительных тканей. В свою очередь, доступность воды для растения зависит от интенсивности притока воды из почвы к поверхности корней, способности растения поглощать воду на этой поверхности, передавать воду стеблям и листьям и потреблять ее за счет транспирации листьев. В регуляции внутреннего водного обмена в растениях значительная роль принадлежит их водоудерживающим силам, которые в основном обусловлены содержанием осмотически активных веществ в клетках и способностью коллоидов набухать⁴.

Внешние факторы. К внешним факторам относятся факторы среды роста. Первым основным фактором, определяющим жизнеспособность растений и связывающим ее с плотностью посева, является почва с ее физико-химическими свойствами, плодородие с показателями емкости (количество минеральных веществ и их фракционный состав), интенсивности (прочность связи веществ с твердой фазой) и кинетики (скорость перехода ионов из твердой фазы в водный раствор). Эти характеристики почвы определяют состояние воды, минеральных солей, ионных соединений в почве и, как следствие, сорбционные свойства корневых систем растений. Поскольку на участке с нормой высева 2,6 млн шт/га начало кущения произошло на 2 недели раньше, чем в случае с нормой высева 6,5 млн шт/га, зимой растения вышли с хорошо развитой корневой системой, более мощными стеблями, чем при плотности высева 6,5 млн шт/га. Эти факты могут быть связаны с улучшенным обеспечением водой редко высаживаемых растений.

Влияние плотности посева на жизнеспособность растений связано с влагоудерживающей способностью клеток, из которых состоят органы растения. В свою очередь, влагоудерживающая способность ячеек связана с содержанием влаги,

⁴ Ахмедов А. Д. Аналитический подход к определению некоторых водно-физических характеристик почв // Мат. Междунар. науч.-практ. конф. «Роль мелиорации и управления водными ресурсами в реализации национальных проектов». М. : МГУП, 2008. С. 1–7.

влагоудерживающей способностью и водопроводностью почвы. Содержание влаги в почве определяется диффузионным потоком, который может создаваться за счет дождевой воды или искусственного орошения. Коэффициент влагопроводности почвы является показателем поступления воды в корневую систему растения. Таким образом, если коэффициент диффузии влаги в почве и коэффициент влагопроводности определяют скорость подачи воды к прорастающим семенам, а затем к корням растений, то плотность заделки семян пшеницы в почву определяет количество влаги, которое должно быть передано из почвы каждому отдельному зародышу. Для оценки диффузионных параметров и влагопроводности почвы необходимо подавать такое количество воды, чтобы обеспечить прорастание семян при выбранной плотности посева. Были использованы модели переноса влаги в почве при подпочвенном орошении.

Была использована методика определения капиллярного давления и максимальной молекулярной влагоемкости на основе водно-физических свойств почвы. Методика основана на теоретической модели, связывающей закон движения жидкости в капиллярно-пористых телах и описывающей зависимость, позволяющую определять влагопроводность на основе основной гидрофизической характеристики почвы – ее плотности⁵ [22].

Для проведения оценок использовалась полуэмпирическая модель [19], которая описывает зависимость коэффициента влагопроводности $K(W)$ от степени влагонасыщенности почвы степенной функцией с помощью соотношения (1):

$$K(W) = K_D \left[\frac{W - W^*}{m - W^*} \right]^n, \quad (1)$$

где K_ϕ – коэффициент фильтрации; m – пористость почвы; W^* – связанная влага, при которой начинается интенсивный перенос воды в жидкую фазу; n – показатель, зависящий от гигроскопичности.

Учитывая, что при норме посева 6,5 млн шт/га количество продуктивных стеблей составило 550 шт. (0,0575 ед/кг стеблей), в то время как на площади при норме посева 2,6 млн шт/га количество таких стеблей составило 575 шт. (0,183 ед/кг стеблей), начальная влажность на единицу растения при плотной посадке семян до 3 раз меньше, чем при редкой. Однако по мере поглощения корнями растений влаги из почвы водопроницаемость уменьшается. Для установления взаимосвязи между коэффициентом диффузии и влагопроводностью в зависимости от влажности почвы был использован коэффициент Гарднера [20]:

$$D(W) = D_0 \exp[\beta(W - W_0)]. \quad (2)$$

где β – параметр, характеризующий почву, D_0 – коэффициент диффузии почвы при начальной влажности W_0 .

С использованием зависимости (2) была проведена оценка влияния плотности посева пшеницы на норму расхода влаги при норме посева 2,6 и 6,5 млн шт/га. Соотношение между значениями $D(6,5)/D(2,6)$, полученными с учетом выросших

⁵ Козловский Т. Водообмен растений. М. : Колос, 1969. 99 с.; Савич В. И., Сычев В. Г., Трубицина Е. В. Химический автограф системы почва-растение. М. : ЦИНАО, 2001. С. 13; Слейтер Р. О. Водный режим растений / Под ред. А. И. Будаговского. Пер. с англ. В. Д. Утехина. М. : Мир, 1970. 365 с.

стеблей, составило $\sim 1,7$ раза. Влияние плотности высева семян пшеницы на потенциальный урожай можно оценить по параметрам сорбционных свойств корневых систем пшеницы с помощью соотношения (3) [21]:

$$Y, \frac{\text{ц}}{\text{га}} = k \left(\sum \frac{Q}{q} \right) \eta K_m K_1 K_2, \quad (3)$$

где Q – фотосинтетически активное излучение; k – коэффициент эффективности поглощения излучения; q – расход энергии на 1 центнер продукта; η – эффективность использования (фотосинтетически активной радиации (ФАР)); K_m – коэффициент, показывающий долю основных продуктов; K_1 – коэффициент, учитывающий потребление энергии из-за свойств почвы и количества подвижных питательных веществ и воды; K_2 – коэффициент, учитывающий сорбционные свойства корней в течение вегетационного периода.

При норме высева 6,5 млн шт/га $Y = 0,0575$ ед/кг, при 2,6 млн шт/га $Y = 0,183$ ед/кг.

Если предположить, что плотность высева не влияет на условия роста семян, а основные параметры соотношения (3) имеют одинаковые значения, за исключением параметров сорбционных свойств корневых систем пшеницы, при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, из соотношения (3) мы можем оценить соотношение между коэффициентами $K_2(2,6) / K_2(6,5) = \sim 3,1$.

Таким образом, поступление воды в растение является количественной функцией ее содержания в свободной форме в почве, свойств почвы и сорбционных свойств корней.

Скорость поглощения воды и глубина, на которой вода извлекается из почвы, сильно различаются в зависимости от характера корневой системы растения.

Это различие отражает различия в глубине распространения и количестве корней при разной плотности посева. Адекватное водопоглощение связано с образованием довольно широко распространенных корневых систем. Самое быстрое поглощение воды происходит в области корневых волосков. Это подтверждается данными на рисунке 4 и значением отношения $K_2(2,6) / K_2(6,5) = 3,1$, полученным для посева пшеницы с нормой высева 2,6 и 6,5 млн шт/га. Способность растения образовывать корневые волоски является важной чертой, которая влияет на скорость потребления воды растениями. Плотность посева изменяет форму и параметры корней растений. Разные размеры корней определяют различия в глубине распределения и количестве корней пшеницы. При высокой плотности посева образуются более мелкие корни, погруженные на меньшую глубину, отсюда и более низкое значение K_2 . На развитие корней значительное влияние оказывала конкуренция между насаждениями. Важно отметить, что для посева озимой пшеницы использовалась технология подготовки почвы, которая обеспечивает высокие показатели диффузии и влагопроводности.

Рост продуктивности растений – это интегральный показатель, характеризующий устойчивость растений ко всем стрессовым воздействиям.

Помимо недостатка воды стресс растений может вызвать засоление почвы. Однако засоление почвы подавляет рост побегов больше, чем корней, в результате чего отношение массы корней к массе побегов увеличивается, а в нашем случае это соотношение не меняется, что указывает на отсутствие засоления почвы как влияющего фактора. Также на отсутствие засоления почвы указывает анализ состава минеральных веществ, внесенных в почву (табл. 1). Тот факт, что технология внесения минеральных веществ была одинаковой для участков с разной нормой

высева (табл. 1), позволяет в первом приближении исключить их из основных факторов влияния и рассматривать как фактор, являющийся функцией скорости подачи воды из почвы в почву. Причиной низкого коэффициента продуктивного кушения растений при высокой норме высева может быть недостаток света.

При отсутствии света у растений наблюдается углеводное голодание, задерживается образование новых побегов, и в то же время тормозится регенерация узловых корней, от степени развития которых зависит энергия кушения. Побеги, которые своевременно не образуют своих корней, рано отмирают. К периоду сбора урожая на единицу площади, при разных нормах высева и благоприятных условиях, количество стеблей часто становится одинаковым. Однако в нашем случае количество выросших стеблей на единицу посадочного материала у пшеницы с низкой нормой высева заметно выше.

Внутренние факторы. Наличие водного потока в почве еще не может обеспечить влагой корневую систему и растение в целом без участия внутренних всасывающих сил. Таким образом, наиболее важной является влагопроводность воды, текущей вверх от корня по внутренним капиллярам растения к стеблям и листьям. Всасывающее действие развивающейся корневой системы может обеспечить осмотическое давление в клетках растения. Доминирующую роль в регуляции поглощения играет сопротивление переносу почвенной влаги внутри растения, связанное с осмотическими явлениями и давлением тургора, т. е. явлениями, особенность которых обусловлена клеточной структурой. В этом случае большое значение имеет геном растения. Корневая система озимой пшеницы волокнистая, с большим количеством тонких ветвящихся корней, покрытых тонкими корневыми волосками (рис. 2–5).

В то же время пшеница с нормой высева 2,6 млн шт/га развивает более мощную и крупную корневую систему (рис. 6) и более высокую урожайность (рис. 5). Большее количество вторичных корней обеспечивает значительно большую всасывающую поверхность на единицу объема почвы (рис. 6). Высокая концентрация посадок, например 6,5 млн шт/га, приводит к уменьшению массы корневой системы (рис. 2–4; 6) для каждого растения из-за конкуренции между посадками за площадь орошаемой почвы. Влажность почвы оказывает значительное влияние на продолжительность роста площади листьев.

Фактором, который чаще всего снижает урожайность растений, является недостаточный рост площади листа и его ограниченный размер. Плотность растений оказывает важное влияние. Более загущенные культуры с тем же режимом увлажнения почвы заканчивают рост листовой несколько раньше, особенно в период цветения. В густо растущих насаждениях площадь листьев уменьшается, в то время как в более редких посадках площадь листьев продолжает расти (рис. 6). Плотность посева определяет влагоудерживающую способность клеток, которая зависит от сортовых особенностей. Осмотические факторы относятся к числу морфологических факторов, определяющих влияние плотности посева на урожайность [15].

Характеристики растений, обусловленные водопоглощением, участвующим в засухоустойчивости, включают способность поддерживать гидратацию растений посредством осмотической регуляции, а также накопление определенных специфических защитных веществ, таких как пролин, сахараиды и белки из семейства дегидринов, которые поддерживают тургор и более высокое относительное содержание воды в растении и листьях. Важно отметить, что уровень гидратации тканей растений, выращенных на участках с низкой нормой высева (100 кг/га),

остается высоким в течение длительного времени. Согласно исследованию [16], различия в плотности посева могут влиять на осмотическую адаптацию и коррелировать с различиями в жизнедеятельности растений пшеницы. Более того, пролин является ключевым осмотически активным веществом, которое может служить индикатором того, что молекула участвует в процессах адаптации. Мы статьи провели исследования по влиянию регулятора роста мелафена на засухоустойчивость пшеницы. В качестве показателя была взята степень накопления свободного пролина. Это вещество обладает защитными свойствами со способностью накапливаться в значительных количествах в растениях при экстремально высоких температурах, сопровождающихся дефицитом воды [17]. Согласно литературным данным, при дефиците воды у ряда растений (пшеницы, ячменя, шпината и др.) концентрация пролина в цитоплазме увеличивается в 100 раз и более [18]. Благодаря своим гидрофильным группам пролин может образовывать агрегаты, которые ведут себя подобно гидрофильным коллоидам. Это объясняет высокую растворимость пролина, а также его способность связываться с поверхностными гидрофильными остатками белков. Следовательно, накопление пролина как осмотически активного органического вещества способствует удержанию воды в клетке. Обработка микроэлементами и регуляторами роста семян, проросших при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, показывает, что в первом случае увеличение влагоудерживающей способности растений выше, чем во втором. У них повышено содержание связанной воды и пролина, что способствует устойчивости растений к неблагоприятным факторам [19].

Оценка устойчивости растений с точки зрения изменения урожайности в зависимости от ее продуктивности может быть проведена в полевых испытаниях для определения специфических и неспецифических реакций растений. Обработка семян питательными растворами изменяет величину окислительно-восстановительного потенциала во внутриклеточной и околоклеточной среде, регулируя активность эндогенных биооксидантов, увеличивает скорость осмотического поглощения влаги клетками семенной оболочки, ускоряя набухание, прорастание и полевую всхожесть семян. Ускорение этих процессов обеспечивает прохождение всех этапов онтогенеза в оптимальные сроки, что особенно важно в условиях недостаточного увлажнения при высокой плотности посева.

Обсуждение и заключение

Внешние и внутренние факторы должны рассматриваться одновременно в виде взаимозависимых факторов роста и развития растений. Скорость подачи воды в корневую систему, стебли и листья, масса корней, площадь листьев, урожайность пшеницы зависят от плотности посева. Оценка влияния плотности высева семян пшеницы на урожайность и параметров сорбционных свойств корневых систем пшеницы проведена с использованием уравнения Гарднера. В опытах установлено, что для плотности посева пшеницы при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га соотношение между значениями коэффициентов диффузии $D(6,5)/D(2,6)$, полученными с учетом выросших стеблей, составило $\sim 1,7$ раза. Накопление пролина в клетке как осмотически активного органического вещества способствует удержанию в ней воды. Обработка микроэлементами и регуляторами роста семян, проросших при норме высева 2,6 и 6,5 млн шт/га, приводит к большему росту концентрации пролина в цитоплазме в первом случае, чем во втором. Причиной низкого коэффициента продуктивного кущения посевов с высокой нормой высева в основном может быть недостаток влаги.

Таблица 1
Table 1

Агрохимическое обследование почвы опытного поля
Agrochemical survey of the soil of the experimental field

№ участка / area	Слой, см / Layer, cm	Содержание в слое от 0 до 30 см, мг/кг почвы / Content in layer from 0 to 30 cm, mg/kg of soil											
		N _{Nitras}	Nitrit	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	Humus, %	pH
1	от 0 до 10	7,5	18,8	19	341	0,5	8,47	1,58	0,10	0,24	0,014	4,2	6,10
	от 10 до 20	4,8	20,0	22	337	0,4	7,52	1,34	0,12	0,24	0,015	4,5	6,00
2	от 20 до 30	4,4	22,2	23	342	0,3	9,40	1,42	0,11	0,24	0,012	4,4	6,05
	от 0 до 10	7,9	17,8	19	336	0,4	7,78	2,07	0,16	0,24	0,015	4,3	6,20
	от 10 до 20	4,7	19,8	26	356	0,1	7,65	1,64	0,08	0,25	0,017	4,5	5,95
	от 20 до 30	4,5	22,4	25	363	0,3	10,02	1,58	0,15	0,23	0,012	4,5	6,00
3	от 0 до 10	7,1	19,8	19	345	0,5	8,77	1,18	0,08	0,24	0,014	4,1	6,50
	от 10 до 20	4,8	20,3	19	338	0,8	8,52	1,54	0,10	0,24	0,014	4,5	6,00
	от 20 до 30	4,4	21,3	19	322	0,3	8,40	1,32	0,11	0,24	0,012	4,4	6,05
	от 0 до 10	7,4	18,3	15	300	0,4	7,91	2,27	0,09	0,25	0,014	4,5	5,95
4	от 10 до 20	4,8	20,9	16	297	0,3	8,50	1,82	0,12	0,24	0,012	4,5	6,00
	от 20 до 30	3,4	20,0	16	301	0,1	7,71	1,58	0,14	0,24	0,018	4,4	6,00

Неодинаковая способность к образованию придаточных корней, которая наблюдается в пределах семейства озимой пшеницы, относится к феномену регенерации. Различия в активности корнеобразования обусловлены взаимосвязью между регенеративной активностью (способностью развивать побег) и засухоустойчивостью пшеницы.

Явление регенерации зависит от плотности посева и является универсальным показателем изменений осмотических факторов. Генетические основы адаптации растений проявляются не только в зависимости от климатических условий, но и от условий обработки почвы. Регулярные периоды засухи приводят к различным эволюционным адаптациям. Плотность посева определяет морфологические, физиологические и биохимические характеристики клеточных адаптивных механизмов растений к переносу воды, ее дефициту, который проявляется непосредственно на молекулярном уровне, связанном с прямой защитной реакцией на стресс, вызванный недостатком воды в клетках. У озимой пшеницы следует отметить способность быстро начинать рост и ассимиляцию. В то же время было отмечено заметное изменение продолжительности фаз в зависимости от метеорологической ситуации. Структура и динамика развития растений позволяет говорить об изменчивости онтогенетического состава, уровня жизнеспособности и пространственного распределения особи в зависимости от климатических, ценологических, эдафических факторов окружающей среды, а также биологических свойств самих видов, т. е. генотипов пшеницы.

Важным фактором является структура почвы, которая определяет параметры водопроводности, а вид формирующейся корневой системы определяется скоростью поглощения воды и глубиной, с которой вода извлекается из почвы в расчете на одно растение. К факторам, определяющим влияние плотности посева на урожайность, относятся осмотические параметры мембран в клетках семян.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишнякова М. А. Генофонд зернобобовых культур и адаптивная селекция как факторы биологизации и экологизации растениеводства (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2008. Т. 43, № 3. С. 3–23. EDN: [JSDYRN](#)
2. Влияние средств химизации и биологизации на урожайность культур зернопропашного севооборота при разных способах основной обработки почвы / Ш. М. Абасов [и др.] // Плодородие. 2022. № 1. С. 54–57. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.14>
3. Теоретические основы эффективного применения современных ресурсосберегающих технологий возделывания зерновых культур / И. Г. Пыхтин [и др.] // Земледелие. 2016. № 6. С. 16–19. EDN: [WWRGXT](#)
4. Кочетов А. А., Драгавцев В. А., Макарова Г. А. Эколого-генетические основы ускоренной интродукции культурных растений // Сельскохозяйственная биология. 2012. Т. 47, № 1. С. 3–6. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.1.3rus>
5. Ахматова М. Х., Батова З. С., Агмурзаев О. Х. Учет состояния почвенного плодородия и информационное обеспечение в КБР плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения // Московский экономический журнал. 2018. № 4. С. 37–45. <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-14036>
6. Агрофизические условия плодородия агропочв алтайской лесостепи и модель их эффективного плодородия / Л. М. Татаринцев [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 2(148). С. 22–29. URL: <https://clck.ru/36wDJS> (дата обращения: 01.07.2023).

7. Current Situation and Perspectives of Education for Agricultural Mechanization in the Republic of Buryatia of the Russian Federation / M. Dorzhiev [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 50, Issue 4. P. 20–24. EDN: UCDDVX
8. Current Situation and Perspectives for Soybean Production in Amur Region, Russian Federation / B. Boiarskii [et al.] // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2020. Vol. 51, Issue 2. P. 33–38. EDN: FCOOED
9. Нормы высева семян овса на осушаемых землях / Ю. И. Митрофанов [и др.] // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 3. С. 56–59. <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/56-59>
10. Политыко П. М., Зяблова М. Н., Пасечник Д. В. Урожайность сортов овса при разных технологиях // Вестник РУДН. Серия: Агрономия и животноводство. 2012. № 1. С. 26–31. EDN: OQOCCB
11. Методология прогнозирования трансгрессий по хозяйственно ценным признакам растений / Г. А. Макарова [и др.] // Методические рекомендации. СПб., 2009. 54 с. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4098.1843>
12. Водный режим и фотосинтетическая способность у генотипов озимой пшеницы в условиях засухи / Ф. И. Г. Гасимова [и др.] // Сельскохозяйственная биология. 2012. Т. 47, № 1. С. 78–82. EDN: PVWOJD
13. Дзюбенко Н. И., Абдушаева Я. М. Адаптация американских экотипов *onobrychis arenaria* (KIT) SER в условиях Новгородской области // Сельскохозяйственная биология. 2012. Т. 47, № 4. С. 106–112. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.4.106rus>
14. Дебелый Г. А., Гончаров А. Г., Меднов А. В. Об оценке адаптивной способности и стабильности у яровой вики по высоте растений в одновидовых и смешанных посевах // Сельскохозяйственная биология. 2011. Т. 46, № 2. С. 90–92. EDN: NQYTRP
15. Osmotic Adjustment and Activity of Stress-Related Genes in Wheats of Different Origin Exposed to Water Stress / E. Solařová [et al.] // Russian Journal of Plant Physiology. 2016. Vol. 63, Issue 4. P. 532–541. <https://doi.org/10.1134/S1021443716030146>
16. Effect of Drought and Combined Drought and Heat Stress on Polyamine Metabolism in Proline-Over-Producing Tobacco Plants / M. Cvikrova [et al.] // Plant Physiol. Biochem. 2013. Vol. 73, Issue 1. P. 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.08.005>
17. Alleviation of Osmotic Stress Effects by Exogenous Application of Salicylic or Absciscic Acid on Wheat Seedlings / I. Marcińska [et al.] // International Journal of Molecular Sciences. 2013. Vol. 14, Issue 7. P. 13171–13193. <https://doi.org/10.3390/ijms140713171>
18. Das S. K., Ghosh G. K., Avasthe R. Valorizing Biomass to Engineered Biochar and its Impact on Soil, Plant, Water, and Microbial Dynamics: A review // Biomass Conversion and Biorefinery. 2022. Issue 12. P. 4183–4199. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00836-5>
19. Костин В. И., Исайчев В. А., Решетникова С. Н. Физиологические аспекты применения физических факторов, микроэлементов и регуляторов роста для повышения засухоустойчивости растений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3(27). С. 58–67. URL: <https://rucont.ru/efd/278979> (дата обращения: 01.07.2023).

Поступила в редакцию 23.05.2023; поступила после рецензирования 26.08.2023; принята к публикации 18.09.2023

Об авторах:

Чаплыгин Михаил Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Технологии и машины для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве» Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: [AAZ-6056-2020](https://orcid.org/AAZ-6056-2020), misha2728@yandex.ru

Жалнин Эдуард Викторович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва,



1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Шибряева Людмила Сергеевна, доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6805-4492>, Researcher ID: A-7634-2014, lyudmila.shibryaeva@yandex.ru

Подзоров Алексей Викторович, научный сотрудник лаборатории Технологий и машин для посева и уборки зерна и семян в селекции и семеноводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-4555>, Scopus ID: 57211759710, alexvp900@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

М. Е. Чаплыгин – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, целей и задач, подготовка первоначального варианта текста, анализ литературных источников, визуализация материалов, доработка текста и оформление материалов, формирование частных и общих выводов, итоговая переработка статьи.

Э. В. Жалнин – формулирование основной концепции исследования, целей и задач, разработка теоретических предпосылок, доработка текста, формирование общих выводов.

Л. С. Шибряева – разработка теоретических предпосылок, выбор сорта озимой пшеницы для исследования, участие в разработке методики опытов, обработка и анализ данных, обсуждение результатов.

А. В. Подзоров – практическое участие в проведении посевов и контроль за фазами развития растения, обработка и анализ данных, визуализация материалов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Vishnyakova M.A. The Gene Pool of Leguminous Crops and Adaptive Selection as Factors of Biologization and Greening of Crop Production (Review). *Agricultural Biology*. 2008;43(3):3–23. (In Russ.) EDN: JSDYRN
2. Abasov Sh.M., Gaplaev M.Sh., Khusaynov H.A., Terekbayev A.A., Abasov M.Sh. The Influence of Chemicalization and Biologization on the Yield of Crops in Grain-Row Crop Rotation Under Different Methods of Primary Tillage. *Fertility*. 2022;1:54–56. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.124.14>
3. Pykhtin I.G., Gostev A.V., Nitchenko L.B., Plotnikov V.A. Theoretical Foundations for the Effective Use of Modern Resource-Saving Technologies for Cultivating Grain Crops. *Agriculture*. 2016; 6:16–19. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: WWRGXT
4. Kochetov A.A., Dragavtsev V.A., Makarova G.A. Ecological-Genetic Basis of Accelerated Introduction of Cultivated Plants. *Agricultural Biology*. 2012;47(1):3–6. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.1.3rus>
5. Akhmatova M.Kh., Batova Z.S., Atmurzaev O.Kh. Accounting for the State of Soil Fertility and Information Support in the CBD for Soil Fertility of Agricultural Lands. *Moscow Economic Journal*. 2018;4:37–45. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-14036>
6. Tatarintsev L.M., Tatarintsev V.L., Myagkiy P.A., Eshchenko S.I. Agrophysical Conditions of Fertility of Agricultural Soils of the Altai Forest-Steppe and a Model of Their Effective Fertility. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2017;2:22–29. Available at: <https://clck.ru/36wDJS> (accessed 01.07.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Dorzhiev M., Hasegawa H., Sandakov T., Sandakova N., Luzbaev K. Current Situation and Perspectives of Education for Agricultural Mechanization in the Republic of Buryatia of the Russian Federation. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;50(4):20–24. EDN: UCDDVX
8. Boiarskii B., Hasegawa H., Lyude A., Kolesnikova E., Sinegovskaya V. Current Situation and Perspectives for Soybean Production in Amur Region, Russian Federation. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(2):33–38. EDN: FCOOED
9. Mitrofanov Yu.I., Antsiferova O.N., Petrova L.I., Pervushina N.K. Norms for Sowing Oat Seeds on Drained Lands. *Bulletin of Russian Agricultural Science*. 2018;(3):56–59. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/3/56-59>
10. Polityko P.M., Zyablova M.N., Pasechnik D.V. Productivity of Oat Varieties under Different Technologies. *Bulletin of RUDN University. Series: Agronomy and Animal Husbandry*. 2012;(1):26–31. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: OQOCCB
11. Makarova G.A., Mirskaya G.V., Kochetov A.A., Sinyavina N.G., Dragavtsev V.A. Methodology for Predicting Transgressions Based on Economically Valuable Plant Traits. *Guidelines*. 2009;54. (In Russ.) <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4098.1843>
12. Gasyмова F.I., Khalygzade M.N., Azizov I.V.A., Guliev N.M. Water Regime and Photosynthetic Capacity in Winter Wheat Genotypes under Drought Conditions. *Agricultural Biology*. 2012;47(1):78–82. (In Russ.) EDN: PVWOJD
13. Dzyubenko N.I., Abdushaeva Y.M. Adaptation of American Ecotypes of *Onobrychis Arenaria* (KIT) SER in the Conditions of the Novgorod Region. *Agricultural Biology*. 2012;47(4):106–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2012.4.106rus>
14. Debely G.A., Goncharov A.G., Mednov A.V. On Assessing the Adaptive Capacity and Stability of Spring Vetch Based on Plant Height in Single-Species and Mixed Crops. *Agricultural Biology*. 2011;46(2):90–92. (In Russ.) EDN: NQYTRP
15. Solařová E., Holková L., Bradáčová M., Smutná P. Osmotic Adjustment and Activity of Stress-Related Genes in Wheats of Different Origin Exposed to Water Stress. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2016;63(4):532–541. <https://doi.org/10.1134/S1021443716030146>
16. Cvikrova M., Gemperlova L., Martincova O., Vaňkova R. Effect of Drought and Combined Drought and Heat Stress on Polyamine Metabolism in Proline-Over-Producing Tobacco Plants. *Plant Physiol. Biochem.* 2013;73(1):7–15. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.08.005>
17. Marcińska I., Czyżyło-Mysza I., Skrzypek E., Grzesiak M.T., Janowiak F., Filek M., et al. Alleviation of Osmotic Stress Effects by Exogenous Application of Salicylic or Abscissic Acid on Wheat Seedlings. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013;14(7):13171–13193. <https://doi.org/10.3390/ijms140713171>
18. Das S.K., Ghosh G.K., Avasthe R. Valorizing Biomass to Engineered Biochar and Its Impact on Soil, Plant, Water, and Microbial Dynamics: A Review. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2022;12:4183–4199. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00836-5>
19. Kostin V.I., Isaichev V.A., Reshetnikova S.N. Physiological Aspects of the Use of Physical Factors, Microelements and Growth Regulators to Increase Drought Resistance of Plants. *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*. 2014;(3):58–67. Available at: <https://rucont.ru/efd/278979> (accessed 01.07.2023). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 23.05.2023; revised 26.08.2023; accepted 18.09.2023

About the authors:

Mikhail E. Chaplygin, Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0031-6868>, Researcher ID: AAZ-6056-2020, misha2728@yandex.ru

Eduard V. Zhalnin, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal



Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5467-0654>, Researcher ID: AAG-1285-2021, zhalnin@yandex.ru

Lyudmila S. Shibryaeva, Dr.Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6805-4492>, Researcher ID: A-7634-2014, lyudmila.shibryaeva@yandex.ru

Alexey V. Podzorov, Researcher of the Laboratory of Technologies and Machines for Sowing and Harvesting Grain and Seeds in Selection and Seed Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-4555>, Scopus ID: 57211759710, alexvp900@yandex.ru

Authors contribution:

M. E. Chaplygin – scientific guidance, formulation of the basic concept of the study, its goals and objectives, preparation of the initial version of the text, analysis of literary sources, visualization of materials, revision of the text and design of materials, formation of particular and general conclusions, final revision of the article.

E. V. Zhalnin – formulation of the basic concept of the study of its goals and objectives, development of theoretical premises, revision of the text, formation of general conclusions.

L. S. Shibryaeva – development of theoretical premises, selection of winter wheat varieties for the study, participation in the development of experimental methods, data processing and analysis, discussion of results.

A. V. Podzorov – practical participation in seed sowing and monitoring the phases of plant development, data processing and analysis, visualization of materials.

All authors have read and approved the final manuscript.