

АГРОНОМИЯ

УДК 633.11:631.559:551.5(571.54)

А.С. Билтуев, Н.М. Гаркушева,
С.В. Хутакова, Б.Б. Цыбенков
A.S. Biltuyev, N.M. Garkusheva,
S.V. Khutakova, B.B. Tsybenov

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СУХОЙ СТЕПИ БУРЯТИИ

FORECASTING WHEAT YIELDS WHEN APPLYING FERTILIZERS IN THE DRY STEPPE OF BURYATIA

Ключевые слова: сухая степь, яровая пшеница, температура, осадки, удобрения, продуктивность.

Жесткие климатические условия, сопутствующие росту и развитию яровой пшеницы на ранних этапах развития, высокая степень их изменчивости, низкое плодородие зональных каштановых почв вызывают определенный риск ведения зернового хозяйства в условиях сухостепной зоны Бурятии. Моделирование зерновой продуктивности яровой пшеницы в зависимости от климатических факторов в период вегетации имеет высокую теоретическую и практическую значимость. На основе большой выборки ($n=45$) построены производственные функции урожайности пшеницы при различных вариантах применения удобрений: без удобрений, при внесении органических (навоз 40 т) и минеральных удобрений ($N_{40}P_{40}K_{40}$). В результате корреляционного анализа из множества признак-факторов, характеризующих условия тепло- и влагообеспеченности атмосферы и почвы, в качестве предикторов отобраны количество выпавших осадков и средняя температура воздуха. Выявлено, что урожай зерна пшеницы значимо связан с метеорологическими условиями в определенные критические периоды развития растения в условиях сухой степи Бурятии: формирование узла кущения-выход в трубку (Z 21-25); выход в трубку (Z 31-36); начало цветения (Z 61-69); налив семян (Z 73-77). На основе выявленных зависимостей построены многофакторные

модели, прогнозирующие урожайность зерна пшеницы в динамике на разных этапах развития и вариантах применения удобрений.

Key words: dry steppe, spring wheat, temperature, precipitation, fertilizers, wheat yield.

The adverse climate conditions during spring wheat growth and development, high variability of climate conditions, low fertility of zonal chestnut soil cause some risks of grain farming in Buryatia's dry steppe zone. Spring wheat yield simulation according to the climate factors during the growing season has very important practical and theoretical implications. Based on large samples ($n = 45$), wheat yield functions in the following different variants of fertilizer application were developed: no fertilizers, organic fertilizer application (manure, 40 t), and mineral fertilizer application ($N_{40}P_{40}K_{40}$). By the correlation analysis, among many factors describing temperature and moisture of the atmosphere and soil, the following predictors were selected: the precipitation amount and average air temperature. It was found that wheat yields significantly depend on the meteorological conditions during certain critical periods of plant development in Buryatia's dry steppe: tillering node development – stem elongation (Z 21-25); stem elongation (Z 31-36); efflorescence (Z 61-69); and grain-filling (Z 73-77). The revealed relations were used to develop multifactor models to forecast wheat yields in dynamics at different development stages and variants of fertilizer application.

Билтуев Александр Семенович, к.б.н., с.н.с., Бурятский НИИ сельского хозяйства; доцент, Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, г. Улан-Удэ. E-mail: sbiltuev@mail.ru.

Гаркушева Наталья Михайловна, к.б.н., ст. преп., Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, г. Улан-Удэ. E-mail: garcusheva@mail.ru.

Хутакова Светлана Владимировна, к.б.н., доцент, Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова; с.н.с., Бурятский НИИ сельского хозяйства, г. Улан-Удэ. E-mail: svetlana-x1@mail.ru.

Цыбенков Баир Батоевич, к.с.-х.н., с.н.с., Бурятский НИИ сельского хозяйства, г. Улан-Удэ. E-mail: tzbair@yandex.ru.

Biltuyev Aleksandr Semenovich, Cand. Bio. Sci., Senior Staff Scientist, Buryat Research Institute of Agriculture; Assoc. Prof., Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, Ulan-Ude. E-mail: sbiltuev@mail.ru.

Garkusheva Natalya Mikhaylovna, Cand. Bio. Sci., Asst. Prof., Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov, Ulan-Ude. E-mail: garcusheva@mail.ru.

Khutakova Svetlana Vladimirovna, Cand. Bio. Sci., Assoc. Prof., Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov; Senior Staff Scientist, Buryat Research Institute of Agriculture, Ulan-Ude. E-mail: svetlana-x1@mail.ru.

Tsybenov Bair Batoyevich, Cand. Agr. Sci., Senior Staff Scientist, Buryat Research Institute of Agriculture, Ulan-Ude. E-mail: tzbair@yandex.ru.

Введение

Возделыванию зерновых культур в сухой степи Бурятии сопутствуют сложные почвенно-климатические условия. Низкое плодородие каштановых почв, жесткий гидротермический режим в период вегетации (засушливый весенне-раннелетний период, большие амплитуды колебаний суточных температур, неравномерность выпадения осадков по фазам развития) существенно ограничивают продуктивность культур. Высокая изменчивость погодных условий вызывает и значительную вариабельность урожайности. Статистических исследований по определению степени влияния климатических факторов на продуктивность зерновых культур в условиях сухостепной зоны проведено крайне мало [1, 2, 4]. Подобные исследования, основанные на значительной выборке, имеют не только высокую теоретическую значимость для растениеводства зерновых культур в сухостепных зонах Сибири, но и экономическую – позволяют прогнозировать объемы производства зерна при складывающихся метеорологических условиях [5, 6].

Цель исследования – на основе многолетних наблюдений провести анализ влияния климатических условий сухой степи Бурятии на рост и развитие яровой пшеницы с построением прогностических моделей ее продуктивности на разных вариантах применения удобрений.

Методика исследований

Изучение связей зерновой продуктивности пшеницы с климатическими условиями периода вегетации проведено нами на основе данных продолжающегося многолетнего полевого агрохимического опыта (1968–2013 гг.), заложенного в сухостепной зоне Бурятии (БурНИИСХ) по программе Геосети ВИУА. В статистическом исследовании изучалась степень влияния различных показателей увлажнения и теплообеспеченности воздуха и почвы на продуктивность пшеницы возделываемой по пару. Для целей моделирования из 13 вариантов полевого опыта отобраны три: контроль – без удобрений, при внесении органических (навоз 40 т) и минеральных удобрений ($N_{40}P_{40}K_{40}$). Исследуемые варианты органической и минеральной систем удобрений рекомендованы под зерновые культуры в сухостепной зоне Бурятии. Опыт проводится на каштановых почвах, обладающих низким потенциальным плодородием: содержание гумуса – $1,35 \pm 0,11\%$, общего азота –

$0,12 \pm 0,01\%$, близкой к нейтральной реакцией среды ($pH_{\text{вод.}} 6,5 \pm 0,1$), высоким содержанием подвижного P_2O_5 (231 ± 22 мг/кг) и обменного K_2O (101 ± 14 мг/кг) по Чирикову. В качестве объекта изучался районированный среднеспелый сорт мягкой яровой пшеницы местной селекции.

Климатические условия в период исследований ($n = 45$ лет) менялись согласно определенным трендам глобального характера. Динамика показателей теплообеспеченности (среднемесячные температуры воздуха, суммы эффективных и активных температур) в долгосрочной ретроспективе имеет линейный характер возрастания при относительно низкой вариабельности их значений. В целом зерновые культуры в достаточной степени обеспечены тепловыми ресурсами для нормального роста и созревания. Основным фактором, лимитирующим продуктивность растений в сухой степи, является дефицит увлажнения на ранних стадиях развития, а в отдельные годы – и в периоды цветения и формирования зерна. Тренд условий влагообеспеченности более сложен и представлен полиномиальной регрессией четвертой степени. В целом наблюдалась определенная закономерность в распределении ресурсов тепла и влаги в период вегетации пшеницы (рис. 1). Дефицит увлажнения, характерный для мая и начала июня, при резком росте среднесуточных температур и интенсивных сухих ветрах, приводит к атмосферной засухе. На этой стадии наиболее важным условием является наличие доступной почвенной влаги в период посева.

Начиная с третьей декады июня условия вегетации становятся более благоприятными, увеличению количества осадков соответствует и рост температур.

Содержание продуктивной влаги в пахотном слое почвы зависит от запасов, сохранившихся с прошлого года, скорости и размеров перемещения влаги по профилю почвы, количества выпавших осадков и эвапотранспирационных потерь. Среднемноголетняя динамика влажности почвы под вегетирующими культурами характеризуется относительно постоянными неудовлетворительными их запасами в пахотном горизонте (менее 20 мм) с мая по август. Запасы влаги снижаются с разной величиной регрессии в более глубоких горизонтах (рис. 2). В целом, в период активного водопоглощения запасы влаги в почве оцениваются как плохие или неудовлетворительные.

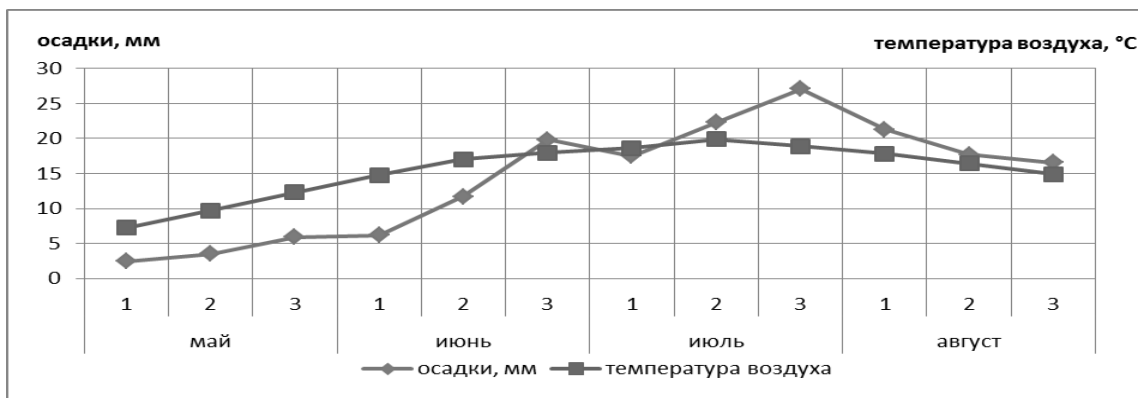


Рис. 1. Среднемноголетние значения количества осадков и температур воздуха (1968-2013 гг.)

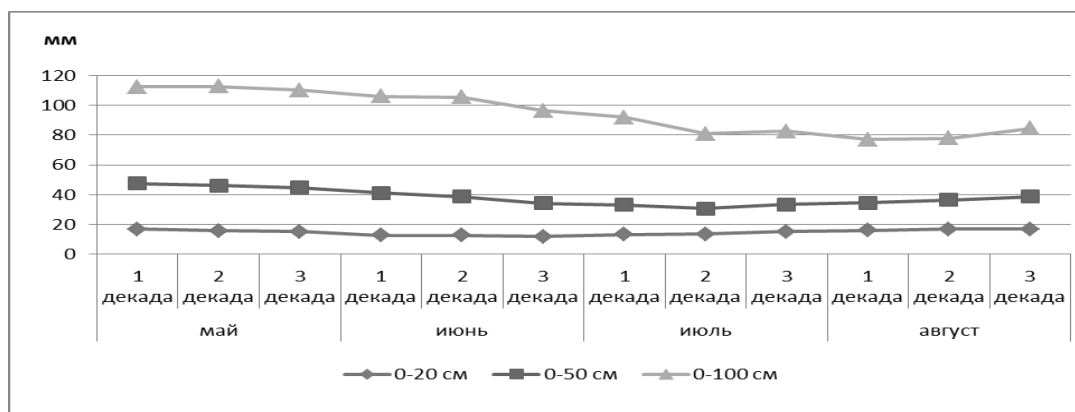


Рис. 2. Динамика продуктивной влаги в различных слоях почвы под пшеницей по пару (ср. 1968-2013 гг.)

Пшеница при благоприятных условиях увлажнения и температур всходит на 10-й день. В наших условиях при посеве в оптимальные сроки полные всходы пшеницы отмечаются на 15-17-й дни (III декада мая). Первый период развития зерновых характеризуется слабым ростом надземной массы и корней. Кущение пшеницы обычно наступает через 12-17 дней после появления всходов, соответственно, в I и III декадах июня. В засушливых условиях этот период растягивается до 30 дней. Выход в трубку зарегистрирован у пшеницы в среднем через 5 дней после полных всходов (II декада июня) и продолжается около 30 дней до I-II декад июля, когда отмечается фаза колошения. Цветение пшеницы происходит в середине июля. Молочная спелость в среднестатистических условиях наступает через 20-25 дней после фазы полного цветения в I-III декадах августа, формирование зерна до полной спелости происходит в течение 30-35 дней. В условиях засухи срок прохождения генеративных фаз резко сокращается.

Результаты исследований

В соответствии со складывающимися метеорологическими условиями и содержанием почвенной влаги в период вегетации формируется определенный уровень продуктивности пшеницы (рис. 3).

Урожайность зерна пшеницы в целом за весь период исследований на контрольном варианте находилась на уровне $16,3 \pm 1,4$ ц/га при очень высокой вариабельности значений ($V = 56,1\%$). Внесение как органических (навоз 40 т), так и минеральных удобрений ($N_{40}P_{40}K_{40}$) оказало практически схожий эффект и позволило повысить урожай, соответственно, до $22,5 \pm 2,1$ и $22,6 \pm 2,1$ ц/га, при этом вариабельность значений также увеличилась до 62%.

Корреляционный анализ влияния параметров тепло- и влагообеспеченности отдельных периодов вегетации на продуктивность пшеницы позволил выявить критические периоды в развитии культуры, условия прохождения которых определяет урожай зерна.

1. Рост средних температур в первой декаде июня достоверно снижал продуктивность пшеницы за счет усиления атмосферной засухи ($r = -0,43...-0,46$). Основным фактором, регулирующим урожай пшеницы в этот период, является наличие влаги в зоне узла кущения, при ее недостатке узловые корни не образуются. Способность образовывать эти корни у яровой пшеницы ограничивается довольно коротким периодом – от формирования узла кущения до выхода в трубку – I-II декады июня.

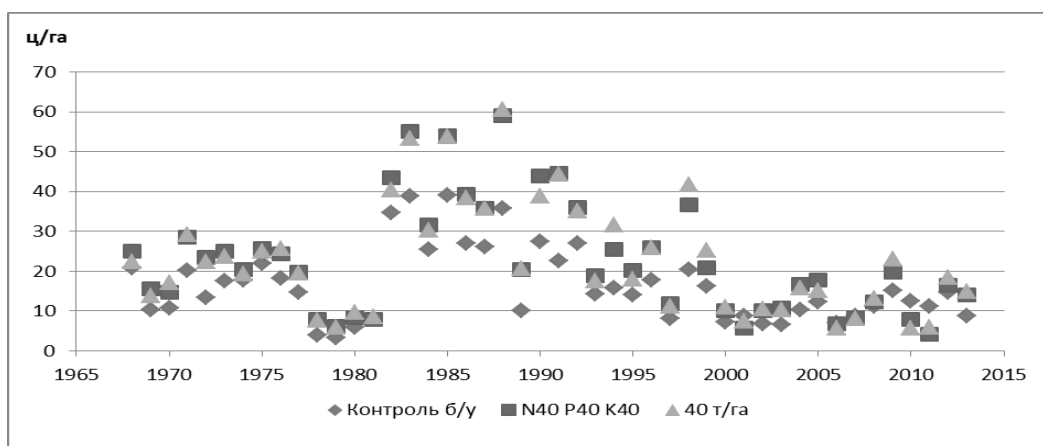


Рис. 3. Динамика урожайности зерна пшеницы в длительном опыте с удобрениями

2. Уровень прибавок пшеницы вне зависимости от систем удобрений зависел от количества осадков, выпавших в третьей декаде июня. По многолетним фенологическим наблюдениям этот период совпадает с фазой выхода в трубку, когда происходит формирование репродуктивных органов пшеницы – закладывается число колосков в колосе и цветков в колосках. В наших условиях в большинстве случаев первый максимум осадков совпадал именно с этим критическим периодом (рис. 1). Корреляционные связи количества осадков (III декада июня) и урожайности зерна были значимыми и средними по всем вариантам опыта ($r = 0,39-0,40$). Соответственно осадкам значимо влияние и температур воздуха в этот период ($r = -0,50...-0,52$).

3. Другой критический период отмечен в третьей декаде июля, который совпадает с фазой начала цветения. Снижение влажности воздуха, как следствие роста среднесуточных температур и сокращения выпадающих осадков, увеличивает стерильность пыльцы и, соответственно, снижает озерненность колоса [3]. Корреляционные связи продуктивности с количеством осадков были значимыми и средними по значению ($r = 0,37-0,40$).

4. Значимое влияние на продуктивность оказывали и осадки в третьей декаде августа. В это время происходит налив семян пшеницы, конечный урожай формируется за счет выполненности зерна. Влияние на урожайность выпадающих осадков было достоверным и средним ($r = 0,34-0,43$), причем удобренные варианты отличались большей отзывчивостью к осадкам.

Продуктивная влага в почве к моменту посева не оказывала существенного влияния на зерновую продуктивность, по всей видимости, из-за относительно стабильных ее запасов после парового поля.

Взаимное влияние удобрений и климатических ресурсов на урожай, было незначительным. Отметим лишь большую отзывчивость

урожая удобренных вариантов на количество выпадающих осадков за май-август ($r = 0,62-0,64$) относительно контроля ($r = 0,58$). Аналогичная тенденция выявлена и по температурам за июнь-июль.

Моделирование урожайности пшеницы по наиболее значимым признакам позволяет спрогнозировать урожайность по климатической ситуации в конце каждого летнего месяца. В качестве предикторов уравнения выступают признак-факторы, в наибольшей степени ограничивающие потенциальную урожайность: условия увлажнения и теплообеспеченности за прошедший период.

На конец июня потенциальная урожайность зерна пшеницы по вариантам опыта определялась следующими многофакторными линейными уравнениями:

$$0\text{-без удобрений} - Y(\text{ц/га}) = 57,6 + 0,15W_{VI} - 2,84 t_{VI}, r^2 = 0,58;$$

$$P_{20} + N_{40}P_{40}K_{40} - Y(\text{ц/га}) = 90,3 + 0,22 W_{VI} - 4,60 t_{VI}, r^2 = 0,59;$$

$$P_{20} + \text{навоз } 40 \text{ т} - Y(\text{ц/га}) = 84,7 + 0,22W_{VI} - 4,32 t_{VI}, r^2 = 0,56.$$

На конец июля возможность получения зерна пшеницы определялась моделями:

$$0\text{-без удобрений} - Y(\text{ц/га}) = 93,3 + 0,07W_{VI-VII} - 4,74 t_{VI-VII}, r^2 = 0,65;$$

$$P_{20} + N_{40}P_{40}K_{40} - Y(\text{ц/га}) = 146,6 + 0,11 W_{VI-VII} - 7,62 t_{VI-VII}, r^2 = 0,72;$$

$$P_{20} + \text{навоз } 40 \text{ т} - Y(\text{ц/га}) = 137,5 + 0,12W_{VI-VII} - 7,14 t_{VI-VII}, r^2 = 0,70.$$

На конец августа аналогичные модели урожайности пшеницы имели вид:

$$0\text{-без удобрений} - Y(\text{ц/га}) = 82,8 + 0,06W_{VI-VIII} - 4,42 t_{VI-VIII}, r^2 = 0,59;$$

$$P_{20} + N_{40}P_{40}K_{40} - Y(\text{ц/га}) = 126,4 + 0,10W_{VI-VIII} - 6,97 t_{VI-VIII}, r^2 = 0,62;$$

$$P_{20} + \text{навоз } 40 \text{ т} - Y(\text{ц/га}) = 116,9 + 0,10W_{VI-VIII} - 6,45 t_{VI-VIII}, r^2 = 0,61.$$

В моделях признак-факторы: W_{VI} , W_{VI-VII} , $W_{VI-VIII}$ – количество выпавших осадков, соответственно, за июнь, июнь-июль, июль-август; t_{VI} , t_{VI-VII} , $t_{VI-VIII}$ – средняя температура воздуха за обозначенные периоды наблюдений.

Заключение

Соотношение коэффициентов регрессии (a_1, a_2, \dots, a_n) в линейных многофакторных моделях вида $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2, \dots + a_nx_n$ выявляет степень влияния различных предикторов на результирующий фактор. Наибольшее воздействие на урожай пшеницы оказывали осадки в начале вегетации (июнь). При типичном дефиците увлажнения в этот период каждые 10 мм выпавших осадков повышали урожай на 1,5-2,2 ц/га, в последующем их влияние несколько сокращалось. Значимость температурного фактора нарастала к июлю и снижалась к августу. Так, рост средних температур воздуха на каждый 1°C в июне снижал урожай зерна на 2,8-4,6 ц/га, а уже в среднем за июнь-июль этот показатель составлял 4,7-7,6 ц/га. Удобренные варианты в условиях сухостепной зоны обладали большей потенциальной урожайностью, но также в большей степени реагировали на изменения количества осадков и средних температур, чем вариант без внесения удобрений.

Модели продуктивности зерновых культур требуют постоянного улучшения за счет расширения базы данных, увеличения количества признак-факторов, в качестве которых могут быть привлечены специфические климатические характеристики среды, показатели агрофизических, агрохимических и биологических параметров и режимов почвы, интенсивности физиологических процессов – транспирации, фотосинтеза, дыхания и др. Необходимость поиска других предикторов вызвано тем, что комплексное воздействие рассматриваемых выше климатических условий на продуктивность зерновых культур не превышало 72%, влияние других факторов осталось неучтенным. Между тем верификация моделей показала высокую степень их достоверности, они могут использоваться для практического применения при прогнозировании урожайности культур по общедоступным метеорологическим показателям.

Библиографический список

1. Билтуев А.С., Будажапов Л.В., Норбожанжилов Р.Д., Цыдыпов Б.Д. Статистические показатели и модели диагностики полевой всхожести овса в земледелии сухой степи // Плодородие. – 2012. – № 2. – С. 23-24.
2. Дабаева М.Д., Цыбенов Б.Б., Билтуев А.С. Влияние климатических факторов на продуктивность яровой пшеницы в условиях сухой степи Бурятии // Сибирский вестник с.-х. науки. – 2010. – № 11. – С. 17-24.
3. Кумаков В.А. Биологические основы возделывания яровой пшеницы по интенсив-

ной технологии. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 102 с.

4. Лапухин Т.П., Билтуев А.С., Рузавин Ю.Н. Влияние климатических факторов на зерновую продуктивность овса в условиях сухостепной зоны Бурятии // Длительное применение удобрений. Агрохимические, агрономические и экологические аспекты: V Сибирские агрохимические Прянишниковские чтения, посвященные 145-летию Д.Н. Прянишникова: матер. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 12-16 июля 2010 г.) / Россельхозакадемия. Сиб. отд-ние. – Новосибирск, 2011. – С. 83-90.

5. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплого режима и продуктивности агроэкосистем. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 167 с.

6. Hoogenboom G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications // Agric. and For. Meteorol. – 2000. – Vol. 103 (1-2). – P. 137-157.

References

1. Biltuev A.S., Budazhapov L.V., Norbovanzhilov R.D., Tsydypov B.D. Statisticheskie pokazateli i modeli diagnostiki polevoi vskhozhesti ovsa v zemledelii sukhoi stepi // Plodorodie. – 2012. – № 2. – S. 23-24.
2. Dabaeva M.D., Tsybenov B.B., Biltuev Vliyanie klimaticheskikh faktorov na produktivnost' yarovoi pshenitsy v usloviyakh sukhoi stepi Buryatii // Sibirskii vestnik s.-kh. nauki. – 2010. – № 11. – S. 17-24.
3. Kumakov V.A. Biologicheskie osnovy vozdelevaniya yarovoi pshenitsy po intensivnoi tekhnologii. – M.: Rosagropromizdat, 1988. – 102 s.
4. Lapukhin T.P., Biltuev A.S., Ruzavin Yu.N. Vliyanie klimaticheskikh faktorov na zernovuyu produktivnost' ovsa v usloviyakh sukhostepnoi zony Buryatii // Dlitel'noe primeneniye udobrenii. V Sibirskie agrokhimicheskie i ekologicheskie aspekty. V Sibirskie agrokhimicheskie Pryanishnikovskie chteniya, posvyashch. 145-letiyu D.N. Pryanishnikova: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Novosibirsk, 12-16 iyulya 2010 g.) / Rossel'khozakademiya. Sib. otd-nie. – Novosibirsk, 2011. – S. 83-90.
5. Sirotenko O.D. Matematicheskoe modelirovaniye vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem. – L.: Gidrometeoizdat, 1981. – 167 s.
6. Hoogenboom G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications // Agric. and For. Meteorol. – 2000. – Vol. 103 (1-2). – P. 137-157.

