

Научная статья

УДК 631.816.3

doi:10.28983/asj.y2021i10pp61-68

Динамика NPK при дифференцированном внесении минеральных удобрений в режиме off-line

Дмитрий Владимирович Чикишев¹, Николай Васильевич Абрамов², Наталья Сергеевна Ларина³, Сергей Владимирович Шерстобитов⁴

^{1,2,4}Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия

³Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

¹79088690714@yandex.ru

²vip.anv.55@mail.ru

³nslarina@yandex.ru

⁴sv5888857@yandex.ru

Аннотация. Эффективность применения минеральных удобрений зависит от различных факторов, одним из которых является способ их внесения. В условиях неоднородности полей по содержанию питательных элементов польза от дифференцированного внесения удобрений будет возрастать. В данном случае на каждый участок поля будет внесено столько удобрений, сколько необходимо для получения планируемой урожайности. Результаты опытов показали, что в условиях северной лесостепи Тюменской области дифференцированное внесение азотных удобрений способствует снижению вариабельности содержания нитратного азота к фазе всходов яровой пшеницы в 2,75 раза относительно содержания перед посевом. Дифференцированное внесение фосфора уменьшает вариабельность подвижного фосфора к фазе уборки пшеницы на 11 %, а подвижного калия – на 21%. В то же время внесение удобрений одной нормой является менее эффективным. Этот способ приводит к снижению вариабельности нитратного азота в 2,07 раза, подвижного фосфора – на 10 %. Вариабельность подвижного калия возрастает на 17 %. После оптимизации минерального питания урожайность яровой пшеницы составила 4,36–4,46 т/га с содержанием белка 14,03–14,57 %, сырой клейковины – 33,0–35,0 %; стекловидность равнялась 87–88 %, масса 1000 зерен – 36,1–36,3 г.

Ключевые слова: минеральные удобрения, элементы питания, внесение удобрений.

Для цитирования: Чикишев Д. В., Абрамов Н. В., Ларина Н. С., Шерстобитов С. В. Динамика NPK при дифференцированном внесении минеральных удобрений в режиме off-line // Аграрный научный журнал. 2021. № 10. С. 61–66. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i10pp61-68>.

AGRONOMY

Original article

NPK dynamics with differential mineral fertilization in off-line mode

Dmitry V. Chikishev¹, Nikolay V. Abramov², Natalya S. Larina³, Sergey V. Sherstobitov⁴

^{1,2,4}Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

³Tyumen State University, Tyumen, Russia

¹79088690714@yandex.ru

²vip.anv.55@mail.ru

³nslarina@yandex.ru

⁴sv5888857@yandex.ru

Abstract. The efficiency of mineral fertilizers depends upon various factors, one of which is fertilization method. In heterogeneous condition of fields of nutrient content, the benefits of variable rate fertilization will increase, cause as much fertilizer will be applied to each section of the field as is necessary specifically on this section to obtain the planned yield. Experimental results have revealed the following features: variable rate fertilizer of nitrogen to reduce the variability of the nitrate nitrogen content in the tillering phase of spring wheat to 36 % relative to the content before sowing, variable rate fertilizer of phosphorus and potassium to reduce variability of labile phosphorus and potassium in soil to the phase of wheat harvesting by 11 and 21 %. The fertilization of one rate is less effective. This method leads to a decrease in the variability of nitrate nitrogen to 48 %, labile phosphorus by 10 %, by variability of labile potassium increases by 17% in the same time. Yield of spring wheat was 4.36–4.46 t/ha with a protein content of 14.03–14.57 %, wet gluten 33.0–35.0 %, glassiness 87–88 %, weight of 1000 grain 36.1–36.3 g were applied with variable rate fertilizers in off-line mode.

Keywords mineral fertilizers, nutrients, fertilization method.

For citation: Chikishev D. V., Abramov N. V., Larina N. S., Sherstobitov S. V. NPK dynamics with differential mineral fertilization in off-line mode. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2021;(10): 61–66 (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i10pp61-68>.

Введение. Содержание подвижных форм азота, фосфора и калия на различных участках поля может отличаться. В связи с этим внесение минеральных удобрений одной нормой по всей площади поля не позволит создать равные условия в обеспеченности сельскохозяйственных растений питательными элементами. Дифференцированный способ внесения удобрений в режиме off-line лишен этого недостатка. Он основан на предварительной подготовке карты-задания с индивидуальными нормами внесения на различных участках поля в зависимости от содержания доступных форм элементов питания [1, 5, 6, 12]. При таком подходе снижаются потери удобрений (переход в недоступные формы, газообразные потери азота, выщелачивание) и повышается их эффективность. Для сельскохозяйственных растений создаются оптимальные условия на каждом участке поля, что позволяет увеличить их урожайность, повысить рентабельность производства [2, 3, 8–11, 13–16].

Цель исследования – изучить влияние дифференцированного внесения минеральных удобрений на выравненность плодородия почвы по содержанию питательных элементов в ней.



Методика исследований. Научно-производственный опыт проводили в 2018–2020 гг. на полях учхоза Государственного аграрного университета Северного Зауралья (г. Тюмень), см. рисунок. Тип почвы опытных полей – чернозем выщелоченный ($\text{рН}_{\text{КCl}}$ 5,4–5,7 ед. рН , содержание гумуса – 4,9–7,5 %); возделываемая культура – яровая пшеница; применяемые удобрения – аммиачная селитра (N 34,4) и азофоска (NPK 15:15:15).



Расположение мест отбора проб

В опыте изучались 5 вариантов в 3-кратной повторности: 1) контроль (без применения минеральных удобрений); 2) традиционный способ внесения на планируемую урожайность яровой пшеницы 3,0 т/га (вносили среднюю расчетную норму по 3 повторностям, элементарным участкам); 3) дифференцированное внесение по элементарным участкам на планируемую урожайность яровой пшеницы 3,0 т/га; 4) дифференцированное внесение по элементарным участкам на планируемую урожайность яровой пшеницы 4,0 т/га; 5) дифференцированное внесение по элементарным участкам на планируемую урожайность яровой пшеницы 5,0 т/га.

Расчет норм удобрений проводили балансовым методом, для каждого элементарного участка на основании содержания элементов питания [4]. Для дифференцированного внесения составлялась карта-задание минеральных удобрений на каждый элементарный участок с учетом содержания элементов питания и планируемой урожайности яровой пшеницы. Карта-задание экспортировалась в бортовой навигационный компьютер, который был связан с регулировочным механизмом доз удобрений.

Оцифровку полей и создание электронной карты-задания для дифференцированного внесения минеральных удобрений в режиме off-line проводили по методике, разработанной под руководством доктора с.-х. наук, профессора Н.В. Абрамова. Каждый элементарный участок в опыте являлся повторностью варианта [7]. Образцы почвы отбирали методом конверта по ГОСТ 28168-89 с глубины пахотного слоя 0–30 см. Содержание нитратного азота в почве определяли по ГОСТ 26951-86, подвижных форм фосфора и калия – по ГОСТ 26204-91 (метод Чирикова). Для оценки эффективности действия различных способов внесения и норм минеральных удобрений применяли статистическую обработку с использованием коэффициента вариации и наименьшей существенной разности (НСР 05).

Результаты исследований. Результаты исследований показали, что в весенний период перед посевом яровой пшеницы в пахотном слое почвы содержание нитратного азота на различных участках поля может сильно отличаться. В среднем по вариантам опыта в 2018 г. перед посевом яровой пшеницы в почве содержалось 3,7–5,4 мг/кг нитратного азота, в 2019 г. – 9,5–11,2 мг/кг, а в 2020 г. – 8,1–15,9 мг/кг. Содержание по элементарным участкам в 2018 г. колебалось от 3,3 до 6,9 мг/кг при коэффициенте вариации 2–38 %, в 2019 г. – от 7,4 до 16,2 мг/кг с вариабельностью 6–39 %, а в 2020 г. – от 6,6 до 32,4 мг/кг при вариабельности 13–90 % соответственно. Пространственная неоднородность поля по содержанию нитратов сформировалась по генетическим и антропогенным причинам (табл. 1).

По результатам анализов видно, что научно-производственные поля имели хороший уровень естественного плодородия. На контролльном варианте (без внесения минеральных удобрений) вследствие интенсивного процесса нитрификации к фазе всходов яровой пшеницы содержание нитратного азота в почве повышалось до 23,9 мг/кг. Традиционное внесение удобрений одной нормой по варианту способствовало снижению вариабельности нитратного азота в почве с 56 до 27 % (в 2,07 раза) при его содержании к фазе всходов яровой пшеницы 39,6 мг/кг почвы. В свою очередь дифференцированное внесение минеральных удобрений с учетом содержания нитратного азота на каждой повторности индивидуально обеспечивало более выравненное содержание нитратного азота по повторностям. Пространственные колебания нитратного азота снижались к фазе всходов с 22 до 8 % (в 2,75 раза) при содержании нитратного азота 36,3 мг/кг почвы. На эффективность дифференцированного внесения азотных удобрений влияли их нормы. Повышенный фон минеральных уд-

брений на планируемую урожайность 4,0 т/га также снижал пространственные колебания содержания нитратного азота при дифференцированном использовании удобрений, но только с 19 до 10 % (в 1,9 раза) при его содержании 42,1 мг/кг. В дальнейшем к фазам кущения и уборки на всех вариантах происходило увеличение вариабельности нитратов в почве.

Таблица 1

Динамика нитратного азота в слое почвы 0–30 см и нормы внесения азотных удобрений

Вариант опыта	Год исследования	Норма внесения азота, кг/га д.в.	Перед посевом	Всходы	Кущение	Уборка
Контроль (без удобрений)	2018	0	3,7	11,5	9,1	3,0
	2019	0	10,0	19,0	6,8	5,3
	2020	0	9,6	41,3	31,4	4,7
	Среднее по варианту	0	7,8	23,9	15,8	4,3
	Средняя вариабельность, %	–	14	14	6	18
Традиционный способ внесения (средняя норма по варианту) на планируемую урожайность 3,0 т/га	2018	56	4,8	22,7	25,6	3,7
	2019	41	11,2	33,2	8,9	5,5
	2020	39	15,9	63,0	52,1	8,4
	Среднее по варианту	45	10,6	39,6	28,9	5,9
	Средняя вариабельность, %	–	56	27	29	32
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 3,0 т/га	2018	55	5,4	23,3	25,4	3,9
	2019	44	10,1	35,6	8,6	4,9
	2020	49	8,1	49,9	45,4	5,8
	Среднее по варианту	49	7,9	36,3	26,5	4,9
	Средняя вариабельность, %	–	22	8	12	23
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 4,0 т/га	2018	96	4,4	29,1	37,4	3,8
	2019	85	9,5	37,2	12,8	5,1
	2020	84	9,7	59,9	58,8	7,0
	Среднее по варианту	88	7,9	42,1	36,3	5,3
	Средняя вариабельность, %	–	19	10	26	23
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 5,0 т/га	2018	132	4,8	30,0	42,5	4,8
	2019	121	10,4	45,0	17,5	5,8
	2020	123	9,1	69,4	53,4	7,6
	Среднее по варианту	125	8,1	48,1	37,8	6,1
	Средняя вариабельность, %	–	9	16	19	31
HCP05	–	–	1,8	9,4	10,1	0,8

Содержание подвижного фосфора на вариантах также различалось. В 2018 г. среднее содержание подвижного фосфора составило 137–189 мг/кг, в 2019 г. – 103–159 мг/кг, а в 2020 г. – 122–167 мг/кг (табл. 2). По элементарным участкам содержание подвижного фосфора варьировало: в 2018 г. – от 70 до 250 мг/кг при коэффициенте вариации 15–55 %, в 2019 г. – от 21 до 250 мг/кг при 11–88 %, а в 2020 г. – от 60 до 250 мг/кг при 37–71% соответственно.

Динамика подвижного фосфора в почве была выражена менее сильно, чем у нитратного азота, что связано с более низкой растворимостью фосфатов в почвенном растворе. По результатам анализов видно, что содержание подвижного фосфора к фазе всходов снижалось на 6–26 мг/кг относительно содержания перед посевом яровой пшеницы. Активное усвоение фосфора культурой продолжалось и в фазу кущения – снижение подвижного фосфора относительно до посевного периода составило 4–32 мг/кг. К уборке вследствие перехода труднорасторимых фосфатов в растворимые формы содержание подвижного фосфора постепенно восстанавливалось до уровня перед посевом.

Содержание подвижного фосфора на выщелоченном черноземе перед посевом яровой пшеницы соответствовало повышенному и высокому и обеспеченности сельскохозяйственных растений (в среднем 128–166 мг/кг). В течение вегетации яровой пшеницы на контролльном варианте коэффициент вариации подвижного фосфора в почве сохранялся на одном уровне 31–32 %. На варианте с традиционным способом внесения (усредненной нормой по повторностям) пространственная вариабельность фосфора от посева к уборке уменьшилась на 10 %, а при дифференцированном внесении минеральных удобрений снижение достигло 11% при содержании подвижного фосфора в почве 166–144 и 139–132 мг/кг соответственно. Хотя эта разница кажется малозначимой, она прослеживается на протяжении всего вегетационного периода.



**Динамика подвижного фосфора (по Чирикову) в слое почвы 0–30 см
и нормы внесения фосфорных удобрений**

Вариант опыта	Год исследования	Норма внесения фосфора, кг/га д.в.	Перед посевом	Всходы	Кущение	Уборка
Контроль (без удобрений)	2018	0	137	105	119	112
	2019	0	124	102	106	120
	2020	0	122	124	124	143
	Среднее по варианту	0	128	110	113	125
	Средняя вариабельность, %	—	32	38	38	31
Традиционный способ внесения (средняя норма по варианту) на планируемую урожайность 3,0 т/га	2018	18	173	129	117	127
	2019	19	159	114	110	112
	2020	18	167	178	174	194
	Среднее по варианту	18	166	140	134	144
	Средняя вариабельность, %	—	29	24	26	19
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 3,0 т/га	2018	19	168	151	166	147
	2019	26	103	80	81	85
	2020	21	146	163	155	163
	Среднее по варианту	22	139	131	134	132
	Средняя вариабельность, %	—	57	47	53	48
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 4,0 т/га	2018	30	164	133	140	154
	2019	35	125	94	94	96
	2020	36	124	125	112	145
	Среднее по варианту	34	138	117	115	132
	Средняя вариабельность, %	—	48	68	58	43
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 5,0 т/га	2018	40	189	181	189	186
	2019	47	131	110	94	104
	2020	44	160	170	184	201
	Среднее по варианту	44	160	154	156	164
	Средняя вариабельность, %	—	56	56	54	58
HCP05		—	—	18	20	20

К фазе всходов на варианте с традиционным внесением фосфора коэффициент вариации его в почве составлял 82,8 % относительно содержания до внесения удобрений (с 29 до 24 %), а при дифференциированном внесении – 82,5 % (с 57 до 47 %). Таким образом, если к фазе всходов яровой пшеницы различия между способами внесения достигали 0,3 %, то к уборке разрыв повысился до 1 %. При повышенном фоне фосфорных удобрений при запланированной урожайности яровой пшеницы 4,0 т/га пространственная вариабельность содержания подвижного фосфора снизилась на 5 % при его содержании в почве 138–132 мг/кг. Внесение фосфора на планируемую урожайность яровой пшеницы 5,0 т/га не приводило к снижению пространственной пестроты содержания фосфора.

Содержание подвижного калия в пахотном слое почвы по вариантам составило в 2018 г. 84–123 мг/кг; в 2019 г. – 102–128 мг/кг; в 2020 г. – 103–156 мг/кг. Наряду с азотом и фосфором пространственная вариабельность калия была выражена довольно сильно. Коэффициент вариации содержания K_2O составил в 2018 г. 6–43 % при содержании подвижного калия по участкам 69–180 мг/кг, в 2019 г. – 15–37 % при 66–145 мг/кг и в 2020 г. – 20–52 % при 80–250 мг/кг (табл. 3).

На протяжении всего вегетационного периода содержание подвижного калия в почве сохранялось приблизительно на одном уровне, что связано с постепенным пополнением подвижных форм калия из общих запасов.

При традиционном способе внесения калийных удобрений пространственная вариабельность содержания калия с момента посева до уборки повышалась на 17 % (с 24 до 28 %) при его содержании в почве 126–149 мг/кг. Дифференцированное внесение калия способствовало созданию более ровного по плодородию поля. При внесении удобрений на планируемую урожайность яровой пшеницы 3,0 т/га пространственная вариабельность снижалась на 21% (с 33 до 26 %) при содержании подвижного калия 122–130 мг/кг почвы. С увеличением норм для получения урожайности зерна 4 т/га пространственные колебания калия в почве снижались на 30 % (с 27 до 19 %) при содержании 103–121 мг/кг, а при плане 5,0 т/га – на 35 % (с 34 до 22 %) при содержании 113–138 мг/кг.



Динамика подвижного калия (по Чиркову) в слое почвы 0–30 см и нормы внесения калийных удобрений

Вариант опыта	Год исследования	Норма внесения калия, кг/га д.в.	Перед посевом	Всходы	Кущение	Уборка
Контроль (без удобрений)	2018	0	84	81	89	81
	2019	0	108	122	133	85
	2020	0	117	121	114	150
	Среднее по варианту	0	103	108	112	105
	Средняя вариабельность, %	—	24	22	23	17
Традиционный способ внесения (средняя норма по варианту) на планируемую урожайность 3,0 т/га	2018	0	93	101	99	121
	2019	0	128	133	109	161
	2020	0	156	170	158	166
	Среднее по варианту	0	126	135	122	149
	Средняя вариабельность, %	—	24	23	29	28
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 3,0 т/га	2018	0	123	101	105	108
	2019	0	102	114	95	138
	2020	0	142	161	150	145
	Среднее по варианту	0	122	125	117	130
	Средняя вариабельность, %	—	33	22	18	26
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 4,0 т/га	2018	20	93	90	93	93
	2019	7	112	133	104	141
	2020	13	103	124	113	128
	Среднее по варианту	13	103	116	103	121
	Средняя вариабельность, %	—	27	21	20	19
Дифференцированное внесение на планируемую урожайность 5,0 т/га	2018	35	101	124	123	129
	2019	29	110	136	112	135
	2020	16	129	144	127	149
	Среднее по варианту	27	113	135	121	138
	Средняя вариабельность, %	—	34	31	19	22
HCP05	—	—	—	14	11	15

В среднем за годы исследований дифференцированное внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность яровой пшеницы 3,0 и 4,0 т/га позволило получить урожайность 4,34 и 4,46 т/га. Это превысило урожайность на контроле на 0,63–0,75 т/га, а на варианте с традиционным внесением минеральных удобрений – на 0,08–0,20 т/га.

На контроле в зерне содержалось белка 12,89 %, сырой клейковины – 28,0 %; стекловидность составила 85 %, масса 1000 зерен – 34,8 г. По сравнению с контролем оптимизация минерального питания при дифференцированном внесении минеральных удобрений позволила повысить долю белка в зерне на 1,14–1,68 % и на 0,47–1,01 % по сравнению с традиционным способом внесения удобрений, массовую долю сырой клейковины – на 5,0–7,0 % и 2,0–4,0 %, стекловидность – на 2–3 и 3–4 %, массу 1000 зерен – на 1,3–1,5 и 0,8–1,0 г соответственно.

Заключение. Дифференцированное внесение азотных удобрений (с учетом содержания нитратного азота в почве по элементарным участкам поля) на планируемую урожайность яровой пшеницы 3,0 т/га приводит к снижению пространственной вариабельности нитратов в почве до 36 % относительно содержания до внесения удобрений (при внесении удобрений сплошной нормой снижение достигает 48 %). Это способствует созданию равных условий для растений.

Внесение фосфора индивидуальными нормами на каждой повторности варианта приводит к снижению его пространственной вариабельности к моменту уборки на 11 %, а в то время как при традиционном внесении – на 10 %. Эффективность внесения фосфорных удобрений выражена меньше, чем азотных, что связано с меньшей растворимостью фосфатов.

Применение калийных удобрений одной нормой по варианту приводит к увеличению коэффициента вариации содержания данного элемента в почве на 17 %, в то время как на варианте с дифференцированным внесением происходит снижение на 21% относительно значений вариации перед внесением удобрений.

Оптимизация минерального питания при дифференцированном внесении минеральных удобрений позволяет получить дополнительно 0,63–0,75 т/га зерна по сравнению с контролем и 0,08–0,20 т/га по сравнению с традиционным способом. Кроме того, в зерне увеличивались доля белка, массовая доля сырой клейковины, стекловидность и масса 1000 зерен.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-316-90001.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Н. В., Семизоров С. А., Шерстобитов С. В. Земледелие с использованием космических систем // Земледелие. 2015. № 6. С. 13–18.
2. Абрамов Н. В., Шерстобитов С. В. Дифференцированное внесение удобрений с использованием спутниковой навигации // Агрохимия. 2018. № 9. С. 40–49.
3. Артемьев А. А. Влияние технологий применения минеральных удобрений на продуктивность полевого севооборота и изменение агрохимических показателей почвы // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 6. С. 39–41.
4. Ермохин Ю. И. Основы прикладной агрохимии. Омск: Вариант-Сибирь, 2004. 120 с.
5. Любич В. А., Попов С. В., Бакиров Ф. Г., Долматов А. П., Курмышин М. Р. Дифференцированное внесение удобрений в режиме точного земледелия // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2012. № 1 (33). С. 73–75.
6. Пономаренко И. Г. Повышение качества дифференцированного внесения минеральных удобрений в режиме OFFLINE // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 2. С. 48–52.
7. Шерстобитов С. В. Дифференцированное внесение азотных удобрений с использованием систем спутниковой навигации: дис. ... канд. с.-х наук. Тюмень, 2015. 200 с.
8. Шерстобитов С. В., Абрамов Н. В. Урожайность яровой пшеницы при дифференцированном внесении азотных удобрений в режиме off-line // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (76). С. 51–55.
9. Argento F., Anken T., Liebisch F., Walter A. Crop imaging and soil adjusted variable rate nitrogen application in winter wheat // Precision agriculture. 2019. P. 511–517.
10. Basso B., Dumont B., Cammarano D., Pezzuolo A., Marinello F., Sartori L. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone // Science of The Total Environment. 2016. No. 545–546. P. 227–235.
11. Diacono M., Rubino P., Montemurro F. Precision nitrogen management of wheat. A review // Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag / EDP Sciences / INRA. 2012. No. 33 (1). P. 219–241.
12. Guowai W., Yunpeng H., Yu C. Research on the model of variable-rate fertilization in maize based on geographic information system // International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2015). 2015. P. 1756–1763.
13. Koch B., Khosla R., Frasier W. M., Westfall D. G. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones // Agronomy Journal. 2004. No. 96 (6). 10.2134/agronj2004.1572.
14. McNunn G., Heaton E., Archontoulis S., Licht M., VanLoocke A. Using a crop modeling framework for precision cost-benefit analysis of variable seeding and nitrogen application rates // Frontiers in sustainable food systems. 2019. No. 10. P. 33–89.
15. Stamatiadis S., Schepers J. S., Evangelou E., Tsadilas C. et al. Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution // Precision Agriculture. 2018. No. 19. P. 570–587.
16. Weisz R., Heiniger R., Whit J. G., Knox B., Reed L. Long-term variable rate lime and phosphorus application for piedmont no-till field crops // Precision Agriculture. 2003. No. 4. P. 311–330.

REFERENCES

1. Abramov N. V., Semizorov S. A., Sherstobitov S. V. Using space systems in agriculture. Zemledelie. 2015;(6):13–18. (In Russ.).
2. Abramov N. V., Sherstobitov S. V. Differential application of nitrogen fertilizers using satellite navigation. Agrokhimiya. 2018.;(9):40–49. (In Russ.).
3. Artemyev A. A. Influence of technologies of application mineral fertilizers on efficiency of a field crop rottation and change of fertility of ground. Achievements of science and technology of AIC. 2014;(6):39–41. (In Russ.).
4. Ermokhin Yu. I. Fundamentals of applied agrochemistry: tutorial. Omsk: Variant-Sibir; 2004. 120 p. (In Russ.).
5. Lyubchich V. A., Popov S. V., Bakirov F. G., Dolmatov A. P., Kuramshin M. R. Differentiated application of fertilizers in the system of intensive farming. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2012;1(33):73–75. (In Russ.).
6. Ponomarenko I. G. Improvement of quality of the differentiated mineral fertilizers application in the off-line mode. Agricultural machines and technologies . 2014;(2):48-52. (In Russ.).
7. Sherstobitov S. V. Differentiated application of nitrogen fertilizers using satellite navigation systems: dissertation for the degree of candidate of agricultural sciences. Tyumen, 2015. 200 p. (In Russ.).
8. Sherstobitov S. V., Abramov N. V. Effect of differentiated application of nitrogen fertilizers in the off-line mode on spring wheat yields. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2019;2(76):51–55. (In Russ.).
9. Argento F., Anken T., Liebisch, Walter A. Crop imaging and soil adjusted variable rate nitrogen application in winter wheat. Precision agriculture; 2019. P. 511–517.
10. Basso B., Dumont B., Cammarano D., Pezzuolo A., Marinello F., Sartori L. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. Science of The Total Environment. 2016;(545–546):227–235.
11. Diacono M., Rubino P., Montemurro F. Precision nitrogen management of wheat. A review. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. 2012;33(1):219–241.
12. Guowai W., Yunpeng H., Yu C. Research on the model of variable-rate fertilization in maize based on geographic information system. International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2015); 2015. P. 1756–1763.
13. Koch B., Khosla R., Frasier W. M., Westfall D. G. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. Agronomy Journal. 2004;96(6). 10.2134/agronj2004.1572.
14. McNunn G., Heato E., Archontoulis S., Licht M., VanLoocke A. Using a crop modeling framework for precision cost-benefit analysis of variable seeding and nitrogen application rates. Frontiers in sustainable food systems. 2019; (10):33–89.
15. Stamatiadis S., Schepers J. S., Evangelou E., Tsadilas C. et al. Variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat under high spatial resolution. Precision Agriculture. 2018;(19):570–587.
16. Weisz R., Heiniger R., Whit J. G., Knox B., Reed L. Long-term variable rate lime and phosphorus application for piedmont no-till field crops. Precision Agriculture. 2003;(4):311–330.

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 28.05.2021; принята к публикации 30.05.2021.
The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 28.05.2021; accepted for publication 30.05.2021.