

УДК 631.81;581.13;581.14;633.14“324”

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ДИНАМИКУ НАКОПЛЕНИЯ БИОМАССЫ И РОСТА РАСТЕНИЙ ОЗИМОЙ РЖИ

© 2023 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}, К. Ф. Шаврина²¹Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия²Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 10.02.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Динамику накопления биомассы и высоты растений озимой ржи (*Secale cereale* L.) изучали в условиях многолетнего стационарного полевого эксперимента (2022 г.), заложенного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве (1982 г.). Систематическое внесение минеральных удобрений (вариант 2 – N65P50K50, вариант 3 – N100P75K75) оказало существенное влияние на высоту и биомассу растений на всех этапах вегетации (8 временных точек в течение 50-ти сут). Для описания динамики биомассы и высоты растений *Secale cereale* L. хорошо подошли сигмоидная (логистическая) и линейная модели, которые позволили вычислить такие параметры, как максимальные биомасса и высота (M_2 , г : H_2 , см), максимальные скорости (V_{\max} , г · сут⁻¹ (см · сут⁻¹)) и средние скорости (b , г · сут⁻¹ (см · сут⁻¹)). Величины V_{\max} нарастания сырой биомассы растений в вариантах 2 и 3 превысило данный показатель для контрольного варианта в 1.7–2.0 раза, V_{\max} нарастания высоты растений варьировалась в пределах 4.2–4.6 см · сут⁻¹, не зависела от внесения минеральных удобрений. Внесение минеральных удобрений привело к увеличению средней скорости нарастания биомассы растений озимой ржи (b , г · сут⁻¹) по отношению к контролю, более чем в 2 раза.

Ключевые слова: динамика биомассы и высоты растений, озимая рожь, минеральные удобрения, логистическая модель, линейная модель, параметры модели.

DOI: 10.31857/S0002188123050101, **EDN:** USLXKS

ВВЕДЕНИЕ

Рост любых организмов является сложным и многоступенчатым процессом, включающим тысячи биохимических реакций, при моделировании вклад каждой реакции учесть не представляется возможным, поэтому в теоретических и практических исследованиях ограничиваются лишь небольшим числом параметров, которые наиболее полно характеризуют моделируемый объект или явление [1]. Закономерности роста растений изучают на разных уровнях: органов, тканей, отдельных процессов (от микроводорослей до древесной растительности) [1–9], применяя различные подходы, методы и модели, в зависимости от цели исследования. Рост – один из важнейших показателей состояния растительного организма. Учет показателей роста наиболее полно раскрывает морфогенез организма как процесс возникновения его формы, морфологического статуса на любой момент времени и положения в ценопопуляции [10].

Для описания процессов, проходящих в агроценозе в основном используют 3 основные модели: линейную, экспоненциальную и сигмоидную (логистическую). Это дает возможность вычислить такие параметры, как скорость, максимальная скорость, период $T_{1/2}$ (периоды полуудвоения массы, полуразложения вещества и т.п.). Одно из основных условий проведения экспериментов такого рода – не менее 6-ти временных точек (наблюдений) [7, 11]. Выявленные закономерности динамики роста растительного организма в зависимости от различных факторов могут послужить основой для управления продукционным процессом [8].

Цель работы – в условиях многолетнего полевого эксперимента установить параметры эмпирических моделей, характеризующих влияние различных доз минеральных удобрений на динамику накопления биомассы и высоты растений озимой ржи.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика почвы опыта

Вариант	рН _{KCl}	C _{орг} , %	Подвижные соединения, мг/кг		
			N _{легкогидр}	P ₂ O ₅	K ₂ O
1. Контроль без удобрений)	4.5 ± 0.2	3.0 ± 0.3	93 ± 8	208 ± 24	90 ± 10
2. N65P50K50	4.5 ± 0.2	3.4 ± 0.5	107 ± 23	266 ± 51	98 ± 20
3. N100P75K75	4.7 ± 0.2	3.8 ± 0.3	110 ± 14	268 ± 15	88 ± 5

Нумерация вариантов та же на рис. 2, 3.

Таблица 2. Динамика накопления биомассы растений озимой ржи в зависимости от дозы минеральных удобрений, г/35 растений (начало выхода в трубку–колошение)

Время, сут	Масса сырая			Масса воздушно-сухая		
	1	2	3	1	2	3
1	33.0 ± 0.9	38 ± 5	38 ± 6	7.0 ± 0.6	7.6 ± 0.9	7.9 ± 1.3
8	47.8 ± 0.4	65 ± 4	75 ± 2	10.7 ± 0.4	12.6 ± 0.7	13.5 ± 0.4
15	72 ± 4	116 ± 8	150 ± 11	16.6 ± 0.8	23.3 ± 1.3	29 ± 1
21	105 ± 6	158 ± 1.0	200 ± 32	22 ± 1	29 ± 0.6	36 ± 6
29	157 ± 7	272 ± 22	324 ± 39	35 ± 4	52 ± 4	59 ± 6
36	223 ± 23	365 ± 37	454 ± 83	58 ± 5	84 ± 8	101 ± 16
43	227 ± 31	449 ± 64	468 ± 34	69 ± 10	127 ± 15	125 ± 11
50	168 ± 4	397 ± 45	402 ± 67	71 ± 2	163 ± 18	163 ± 26

Примечание. В графе 1 – контроль без удобрений, 2 – N65P50K50, 3 – N100P75K75.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние различных доз минеральных удобрений на динамику биомассы растений озимой ржи (*Secale cereale* L.) изучали в условиях многолетнего стационарного полевого эксперимента в течение вегетационного периода 2022 г.

Агроэкологический стационар был заложен в Меньковском филиале Агрофизического института (1982 г., Ленинградская обл., Гатчинский р-н). Опыт представляет собой 7-польный зернотравянопропашной севооборот с традиционным для Северо-Западного региона набором и чередованием культур: сидеральный пар – рожь озимая – ячмень + многолетние травы – многолетние травы 1-го и 2-го годов пользования – картофель – рапс яровой. Общая площадь севооборота – 4.2 га, одного поля – 0.6 га. В пределах каждого поля было заложено 3 варианта основного удобрения: 1 – контроль без удобрений, 2 – N65P50K50, 3 – N100P75K75, формируемых ежегодным предпосевным внесением минеральных удобрений (смесь аммиачной селитры и аммофоски = 1 : 3) [12]. Площадь варианта (делянки) – 30 × 62 м = 1860 м². Почва – дерново-слабоподзолистая, легкосуглинистая, мощность пахотного слоя 23 см (табл. 1).

Посев озимой ржи сорта Славия (сорт включен в Госреестр в Северо-Западном регионе, рекомендован для возделывания в Ленинградской обл.) проводили 9 сентября 2021 г. Всходы были зафиксированы через 10 сут после посева. Минеральные удобрения были внесены 30 апреля 2022 г.

Для отбора почвенных и растительных проб в каждом варианте в пределах тестируемого поля был выделен участок 1 × 62 м. Растительные пробы отбирали в каждом варианте в 3-кратной повторности – 8 отборов за вегетацию (12 мая–30 июня, периодичность отражена в табл. 2). Определяли сырую, воздушно-сухую биомассу и высоту растений. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Растительные пробы отбирали в период начала выхода в трубку–колошения в течение 50-ти сут (табл. 2). Количество растений в смешанной пробе изменяли по мере увеличения биомассы – от 80-ти (1-й отбор) до 16-ти шт. (8-й отбор). При обработке результатов, характеризующих динамику биомассы, количество растений в пробах во всех отборах было приведено к единому показателю – 35 шт.



Рис. 1. Стационарный полевой эксперимент, озимая рожь.

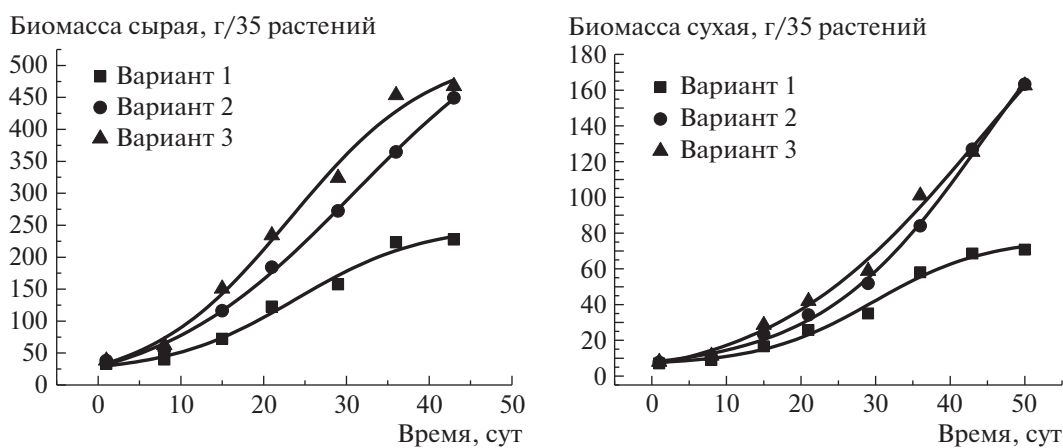


Рис. 2. Влияние различных доз минеральных удобрений на динамику накопления биомассы растений озимой ржи (сырая биомасса 1–42 сут, воздушно-сухая биомасса 1–50 сут).

Установлено, что систематическое внесение минеральных удобрений существенно влияло на высоту и биомассу растений на всех тестируемых этапах роста растений. Наиболее существенные различия наблюдали по отношению контролю: сырая и воздушно-сухая биомасса растений на 50-е сут наблюдения (колошение) возросла при внесении минеральных удобрений в дозах N65P50K50 (вариант 2) и N100P75K75 (вариант 3) на 137–139 и 130% соответственно. На рис. 1 четко прослежена граница между вариантами 1 и 2 (по интенсивности окрашивания посева).

На 50-е сут наблюдали снижение сырой биомассы растений. Известно [13], что рост не всегда сопровождается увеличением размера и массы растения. Например, в процессе прорастания семена теряют до 50% сухого вещества; у злаков в

период формирования генеративных органов масса сухого вещества не только не увеличивается, но иногда даже снижается. Скорость роста различна у различных органов, зависит от вида растения, регулируется внешними и внутренними факторами.

Динамика накопления биомассы и высоты растений озимой ржи может быть аппроксимирована сигмоидной (логистической) и линейной моделями. Логистическая модель позволяет установить такие показатели динамики роста растений как максимальная биомасса или высота и максимальная скорость нарастания биомассы или высоты. Для описания динамики накопления биомассы растений данная модель имеет вид (рис. 2):

$$M = \frac{M_1 - M_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + M_2, \quad (1)$$

Таблица 3. Параметры модели (1), характеризующие динамику накопления биомассы растений озимой ржи

Вариант	Параметры модели					
	r^2	M_1 , г/35 шт.	M_2 , г/35 шт.	t_0 , сут	dt	V_{\max} , г · сут ⁻¹
Биомасса сырая (1–42 сут)						
1. Контроль	0.985	33	227	24 ± 0.9	5.7 ± 0.7	9.0
2. N65P50K50	0.989	38	449	26.5 ± 0.7	6.6 ± 0.6	15.6
3. N100P75K75	0.984	38	468	23.3 ± 0.9	6.1 ± 0.8	17.6
Биомасса воздушно-сухая (1–50 сут)						
1. Контроль	0.988	7	71	28.7 ± 0.8	6.0 ± 0.7	2.7
2. N65P50K50	0.984	7.6	163	34.9 ± 0.8	6.5 ± 0.8	6.0
3. N100P75K75	0.984	7.9	163	33 ± 0.9	7.4 ± 0.8	5.0

где M_1 – начальная биомасса, г, (равна нулю); M_2 – максимальная биомасса, г; t_0 – точка перегиба, в момент которой $M = 1/2 (M_1 + M_2)$; dt – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой. Скорость прироста биомассы (г/сут) достигает максимума в момент, когда $t = t_0$. Отношение $(M_2 - M_1) : 4dt$ характеризует скорость на момент времени t_0 (максимальную, V_{\max}), г · сут⁻¹. Параметры модели представлены в табл. 3.

Параметры модели количественно характеризуют влияние минеральных удобрений на динамику накопления биомассы растений озимой ржи. Установлено, что максимальная биомасса (M_2) в вариантах 2 и 3 превысила данный показатель в контрольном варианте опыта в 2.0–2.1 раза (сырая) и в 2.3 раза (воздушно-сухая). Следует отметить, что существенные различия между вариантами 2 и 3 наблюдали на 8–36-е и 50-е сут наблюдений (табл. 1), что отразилось на показате-

лях V_{\max} : в вариантах 2 и 3 максимальная скорость нарастания сырой биомассы составила 15.6 и 17.6 г сут⁻¹ соответственно, что превысило данный показатель в контрольном варианте в 1.7 и 2.0 раза соответственно (табл. 3). Полученные показатели V_{\max} по порядку величин согласуются с показателями максимальной скорости нарастания биомассы растений ячменя, установленными нами ранее [8].

Линейная модель позволила установить среднюю скорость нарастания биомассы растений за тестируемый период вегетации (данные табл. 1):

$$M(t) = M_0 + bt, \quad (2)$$

где $M(t)$ – биомасса растений (г) на момент времени t ; M_0 – биомасса растений (г) на момент первого отбора; b – скорость увеличения биомассы, г · сут⁻¹. Параметры модели представлены в табл. 4.

Коэффициенты корреляции (r), характеризующие динамику нарастания биомассы, варьировались в пределах 0.901–0.974, при критическом значении r на 5%-ном уровне значимости, равном 0.707. Выявлено, что внесение минеральных удобрений привело к увеличению средней скорости прироста биомассы растений озимой ржи по отношению к контролю, более чем в 2 раза. Величина b (г · сут⁻¹) в опыте варьировалась в пределах 4.0–9.4 (сырая биомасса) и 1.5–3.2 (воздушно-сухая биомасса). Следует отметить, что увеличение дозы минеральных удобрений на 50% (вариант 3 по отношению к варианту 2) не оказало существенного влияния на такие показатели как максимальная биомасса (табл. 3), средняя скорость нарастания биомассы (табл. 4), биомасса в фазе колошения (табл. 2).

Динамика высоты растений озимой ржи в период наблюдения также хорошо аппроксимиро-

Таблица 4. Параметры линейной модели, характеризующие динамику накопления биомассы растений озимой ржи (начало выхода в трубку–колошение)

Вариант	N	r	b , г · сут ⁻¹
биомасса сырая			
1. Контроль	8	0.901	4.0 ± 0.8
2. N65P50K50	8	0.970	9.0 ± 0.9
3. N100P75K75	8	0.948	9.4 ± 1.3
биомасса воздушно-сухая			
1. Контроль	8	0.974	1.5 ± 0.1
2. N65P50K50	8	0.952	3.2 ± 0.4
3. N100P75K75	8	0.969	3.2 ± 0.3

Примечание. Критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна 0.707. То же в табл. 6.

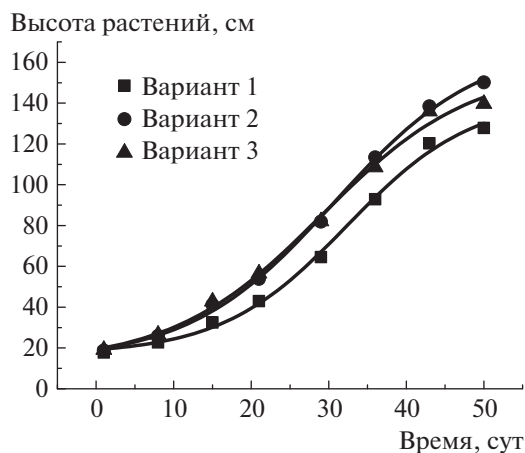


Рис. 3. Влияние различных доз минеральных удобрений на динамику высоты растений озимой ржи (начало выхода в трубку—колошение).

валась сигмоидной (логистической) функцией (рис. 3):

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2 \quad (3)$$

где H_1 — начальная высота, см (равна нулю); H_2 — максимальная высота растений, см; t_0 — точка перегиба, в момент которой $H = 1/2(H_1 + H_2)$; dt — крутизна кривой (угол наклона) — постоянная величина для данной кривой. Скорость роста в высоту (см/сут) достигала максимума в момент $t = t_0$. Отношение $(H_2 - H_1)/4dt$ характеризовало скорость на момент времени t_0 (максимальную, V_{\max}), см/сут. Параметры модели представлены в табл. 5.

Наблюдали тенденцию к увеличению максимальной высоты растений озимой ржи (M_2) в вариантах 2 и 3 по отношению к контролю. Скорость роста растений в высоту (V_{\max}) варьировалась в пределах 4.2–4.6 см · сут⁻¹, внесение минеральных удобрений не оказало существенного влияния на данный показатель.

Среднюю скорость нарастания высоты растений устанавливали по линейной модели:

$$H(t) = H_0 + bt, \quad (4)$$

где $H(t)$ — высота растений (см) на момент времени t ; H_0 — высота растений (см), на момент первого отбора; b — скорость увеличения высоты, см · сут⁻¹. Параметры модели представлены в табл. 6.

Выявлено, что внесение минеральных удобрений привело к достоверному увеличению средней скорости роста растений озимой ржи в высоту на 12–20% по отношению к контролю.

Временную и пространственную неоднородность высоты растений озимой ржи в течение вегетации характеризовали вариационно-статистические показатели, представленные в табл. 7. Величины коэффициентов вариации (v) изменялись в пределах 6–18%, что позволило рассматривать высоту растений в пределах вариантов опыта как однородную [14].

ВЫВОДЫ

1. Для эффективного управления продукционным процессом сельскохозяйственных культур необходимо владеть знаниями о закономерностях роста и развития растений в изменяющихся почвенно-климатических условиях. Для выявления этих закономерностей необходима информация о динамике указанных процессов, т.е. нужно установление зависимостей “время—ответ”.

2. Для описания динамики биомассы и высоты культурных растений в течение вегетации хорошо подходят сигмоидная (логистическая) и линейная модели, которые позволяют вычислить такие параметры, как максимальная биомасса и высота (M_2 , г и H_2 , см), максимальная скорость (V_{\max} , г · сут⁻¹ (см · сут⁻¹)) и средняя скорость (b , г · сут⁻¹ (см · сут⁻¹)). В условиях многолетнего стационарного полевого эксперимента установлены параметры указанных моделей, характеризующие влияние систематического внесения минеральных удобрений на динамику накопления биомассы и высоты растений озимой ржи (период начала выхода в трубку—колошение).

3. Установлено, что максимальная скорость (V_{\max}) нарастания биомассы растений озимой ржи

Таблица 5. Параметры логистической модели (3), характеризующие динамику высоты растений озимой ржи

Вариант	Параметры модели					
	r^2	M_1 , см	M_2 , см	t_0 , сут	dt	V_{\max} , см · сут ⁻¹
1. Контроль	0.991	17.8	128	30 ± 0.7	6.6 ± 0.6	4.2
2. N65P50K50	0.994	18.7	150	28.6 ± 0.6	7.2 ± 0.5	4.6
3. N100P75K75	0.989	19.1	140	27.2 ± 0.8	7.2 ± 0.7	4.2

Таблица 6. Параметры линейной модели, характеризующие динамику высоты растений озимой ржи (начало выхода в трубку—колошение)

Вариант	N	r	b , см сут ⁻¹
1. Контроль	8	0.975	2.4 ± 0.2
2. N65P50K50	8	0.985	2.9 ± 0.2
3. N100P75K75	8	0.987	2.7 ± 0.2

Таблица 7. Вариационно-статистические показатели, характеризующие неоднородность динамики высоты растений озимой ржи

Вариант	N	M	$\pm\delta$	min	max	v , %
1-й замер						
1. Контроль	50	18	2	13	22	11
2. N65P50K50	50	19	2	14	23	10
3. N100P75K75	50	19	2	15	25	10
2-й замер						
1. Контроль	75	23	3	17	29	13
2. N65P50K50	75	26	3	19	36	12
3. N100P75K75	75	26	4	17	36	15
3-й замер						
1. Контроль	75	32	3	26	41	9
2. N65P50K50	75	41	5	29	52	12
3. N100P75K75	75	43	6	29	56	14
4-й замер						
1. Контроль	75	43	6	33	57	14
2. N65P50K50	75	54	8	40	83	15
3. N100P75K75	75	56	10	33	86	18
5-й замер						
1. Контроль	60	64	9	44	85	14
2. N65P50K50	60	82	10	55	100	12
3. N100P75K75	60	82	10	62	102	12
6-й замер						
1. Контроль	48	93	12	66	113	13
2. N65P50K50	48	113	11	85	140	10
3. N100P75K75	48	108	11	80	128	10
7-й замер						
1. Контроль	48	120	14	72	147	12
2. N65P50K50	48	138	10	119	166	7
3. N100P75K75	48	136	11	109	166	8
8-й замер						
1. Контроль	48	128	14	81	152	11
2. N65P50K50	48	150	14	114	177	9
3. N100P75K75	48	140	9	119	161	6

в вариантах с минеральными удобрениями (вариант 2 — N65P50K50, вариант 3 — N100P75K75) составила 15.6 и 17.6 (сырая) и 5.0 и 6.0 г · сут⁻¹ (воздушно-сухая) соответственно, что превысило данный показатель для контрольного варианта в 1.7 и 2.0 раза соответственно. Максимальная скорость увеличения высоты растений варьировалась в пределах 4.2–4.6 см · сут⁻¹, существенно не зависела от внесения минеральных удобрений.

4. Внесение минеральных удобрений привело к увеличению средней скорости нарастания биомассы растений озимой ржи (b , г · сут⁻¹) по отношению к контролю, более чем в 2 раза, средней скорости увеличения высоты (b , см · сут⁻¹) — на 12–20%.

5. Увеличение дозы минеральных удобрений на 50% (вариант 3 по отношению к варианту 2) не оказало существенного влияния на такие показатели как максимальные биомасса и высота, средняя скорость нарастания биомассы, максимальная скорость увеличения высоты, биомасса в фазе колошения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тренкешу Р.П., Лелеков А.С. Моделирование роста микроводорослей в культуре. Белгород: ООО “КОНСТАНТА”, 2017. 152 с.
2. Абакумов А.И., Пак С.Я. Динамика биомассы фитопланктона в зависимости от минерального питания (математические модели) // Моделирование систем. 2010. № 3 (25). С. 10–19.
3. Лысенко С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах // Исслед-е Земли из космоса. 2019. № 4. С. 48–59.
4. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесобразующих пород Урала // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 1 (80). С. 4–14.
5. Лелеков А.С. Моделирование роста и биосинтеза морских микроводорослей в квазинепрерывной культуре: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Севастополь, 2009. 24 с.
6. Courne'de P.H. Dynamic system of plant growth. Mathematics. Universite montpellier II. Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. 77 s.
7. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50–53.
8. Витковская С.Е. Закономерности формирования биомассы и элементного состава растений ячменя в полевом опыте // Агрехимия. 2015. № 1. С. 63–72.
9. Courne'de P.H., De Reffye P. A generalized poisson model to estimate inter-plant competition for light // Plant growth modeling, simulation, visualization and

- their applications / Ed. T. Fourcaud, X. Zhang. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society, 2007. <https://doi.org/10.1109/PMA.2006.37>
10. Методы изучения ценопопуляций цветковых растений: учеб.-метод. пособ. для магистров биол. фак-та / Сост. А.С. Кашин, Т.А. Крицкая, Н.А. Петрова, И.В. Шилова. Саратов, 2015. 127 с.
 11. *Витковская С.Е.* Методы оценки пространственной и временной неоднородности биомассы и элементного состава сельскохозяйственных культур. СПб.: АФИ, 2019. 92 с.
 12. *Шпанев А.М.* Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Совр. пробл. ДЗЗ из космоса. 2019. Т. 16 (3). С. 61–68.
 13. *Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А.* Физиология растений: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2006. 743 с.
 14. *Витковская С.Е.* Методы оценки неоднородности почвенного покрова при планировании и проведении полевых опытов. СПб.: АФИ, 2011. 52 с.

Influence of Mineral Fertilizers on the Dynamics of Biomass Accumulation and Plant Growth of Winter Rye

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#} and K. F. Shavrina^b

^aRussian State Hydrometeorological University
Voronezhskaya ul. 79, Saint-Petersburg 192007, Russia

^bAgrophysics Research Institute
Gragsdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

[#]E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

The dynamics of biomass and height of *Secale cereale* L. plants was studied in a long-term stationary field experiment on sod-podzolic light loamy soil. Systematic application of mineral fertilizers (option 2 – N65P50K50, option 3 – N100P75K75) had a significant impact on the height and biomass of plants at all tested stages of vegetation (eight time points within 50 days). To describe the dynamics of biomass and height of *Secale cereale* L. plants, sigmoid (logistic) and linear models are well suited, which made it possible to calculate such parameters as maximum biomass and height ($M_2, g : H_2, cm$), maximum speed ($V_{max}, g \cdot day^{-1}$ ($cm \cdot day^{-1}$)) and average speed ($b, g \cdot day^{-1}$ ($cm \cdot day^{-1}$)). The V_{max} values of the growth of raw plant biomass in variants 2 and 3 exceeded this indicator for the control variant by 1.7–2.0 times; V_{max} of plant height growth varied within 4.2–4.6 $cm \cdot day^{-1}$, did not depend on the application of mineral fertilizers. The application of mineral fertilizers led to an increase in the average growth rate of the biomass of plants *Secale cereale* L. ($b, g \cdot day^{-1}$), in relation to the control, by more than 2 times.

Key words: plant height and biomass dynamics, winter rye, mineral fertilizers, logistic model, linear model, model parameters.