



Разработка множественной регрессионной математической модели продуктивности пастбища на протяжении производственного сезона или периода

Методические рекомендации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Разработка множественной
регрессионной математической
модели продуктивности пастбища
на протяжении производственного
сезона или периода**

Ставрополь
2022

УДК 636.086.2:528.88(076)

ББК 46:26.190я73

P17

Разработка множественной регрессионной математической модели продуктивности пастбища на протяжении производственного сезона или периода : методические рекомендации / Т. С. Лесняк, С. А. Олейник, С. А. Проказин, Д. Б. Литвин ; Ставропольский гос. аграрный ун-т. – Ставрополь, 2022. – 32 с.

Предназначены для специалистов в области пастбищного животноводства, а также для научно-технических работников – исполнителей научно-исследовательских работ по теме: «Разработка научно-методических подходов повышения эффективности использования пастбищных территорий, предотвращения их деградации, прогнозирования и сохранения биоразнообразия на территории Ставропольского края с использованием средств спутниковых технологий». Соглашение: 22-26-20112.

УДК 636.086.2:528.88(076)

ББК 46:26.190я73

Подписано в печать 07.12.2022.

Формат 60x84¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 1,86. Тираж 10 экз. Заказ № 340.

Отпечатано с готового оригинала-макета в типографии издательско-полиграфического комплекса СтГАУ «АГРУС», г. Ставрополь, ул. Пушкина, 15.
Тел. 35-06-94.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Проведение математической обработки дистанционно полученных данных и визуальной оценки состояния пастбищ: корреляционные взаимосвязи между результатами телеметрии и спектральных характеристик и фактических данных плодородия почв, биологической продуктивности пастбищ	6
2. Построение прогностических математических моделей состояния пастбищных территорий, эффективности ведения пастбищного животноводства	17
3. Разработка методики прогнозирования биологической продуктивности пастбищных угодий и оптимизации технологической нагрузки для различных половозрастных групп пастбищных животных на основе применения корреляционных соответствий между спектральными характеристиками, полученными по результатам дистанционной телеметрии и фактическими производственными данными	25
Заключение	30
Список литературы	31

ВВЕДЕНИЕ

Сельскохозяйственное изучение территории – одно из эффективных направлений использования аэрокосмического мониторинга. Круг вопросов, решение которых возможно по снимкам, полученным при использовании спутниковых фотографий и снимков из технологической аппаратуры беспилотных летательных аппаратов включает как задачи оперативного получения информации о составе и состоянии сельскохозяйственных культур, потенциальной урожайности, болезнях и повреждениях посевов вредителями, так и задачи инвентаризации земельных ресурсов, оценки биомассы, изучения динамики сельскохозяйственного использования земель.

Достоинство дистанционных материалов, получаемых в процессе проведения аэрокосмических съемок – это однородность и сравнимость данных, полученных для обширных территорий, большая обзорность, современность и перманентность – являются решающими для вышеназванных задач.

Приоритетное развитие отечественного животноводства должно сопровождаться созданием условий для развития кормовой базы в разных регионах страны. Для увеличения производства продукции животноводства необходимо повысить продуктивность существующих природных пастбищ и сенокосов, создавать культурные пастбища и сенокосы, как это принято во многих странах мира. Важным резервом в увеличении производства дешевых и полноценных по питательности кормов, природные сенокосы и пастбища.

Природные пастбища дают до 58% всех кормов, производимых в стране. Охватывая значительную территорию, пастбища, по сути, определяют экологическую и экономическую обстановку на огромных просторах и от их состояния в прямой зависимости находится экологическая среда и экономика страны в целом. Поэтому, пастбища должны использоваться на научной основе, чтобы сохранить и обеспечить их продуктивное долголетие. Требуется новый подход к эффективному управлению пастбищами для развития отечественного

животноводства, необходима своевременная, точная и полная информация о состоянии кормовых угодий для рационального и эффективного использования пастбищных ресурсов.

Выращивание овец основано на применении традиционных технологий, недостатком которых является отсутствие оперативной информации о состоянии растительной биомассы на имеющихся пастбищных участках, поскольку в овцеводческих хозяйствах размеры пастбищ могут достигать нескольких тысяч гектаров, расположенных на удалении в несколько десятков километров. Внедрение дистанционного мониторинга состояния растительной биомассы пастбищных участков является одним из важных направлений повышения эффективности отрасли животноводства в целом, поскольку позволит развивать сельские территории, повышать инвестиционную и социальную привлекательность отрасли.

1. Проведение математической обработки дистанционно полученных данных и визуальной оценки состояния пастбищ: корреляционные взаимосвязи между результатами телеметрии и спектральных характеристик и фактических данных плодородия почв, биологической продуктивности пастбищ

Исследование влияния температуры воздуха и уровня осадков для прогноза пастбищного плодородия

Использовались данные полученные в ходе обследования пастбищ СПК «Племзавод Вторая Пятилетка» (Ипатовского района).

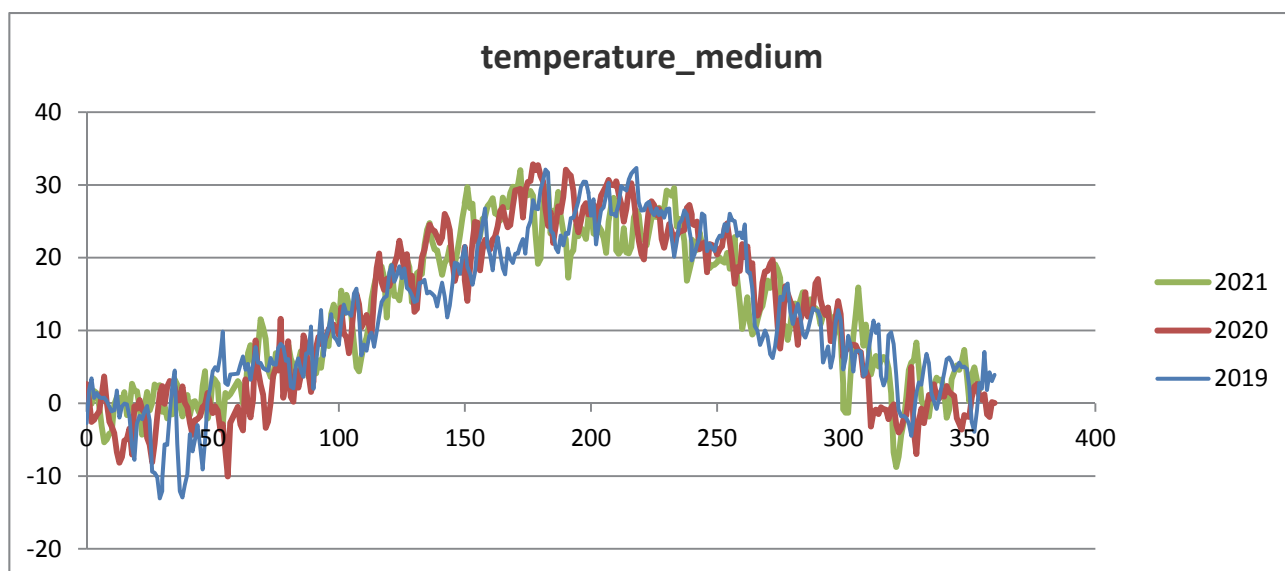


Рисунок 1 – Средняя температура воздуха, С°

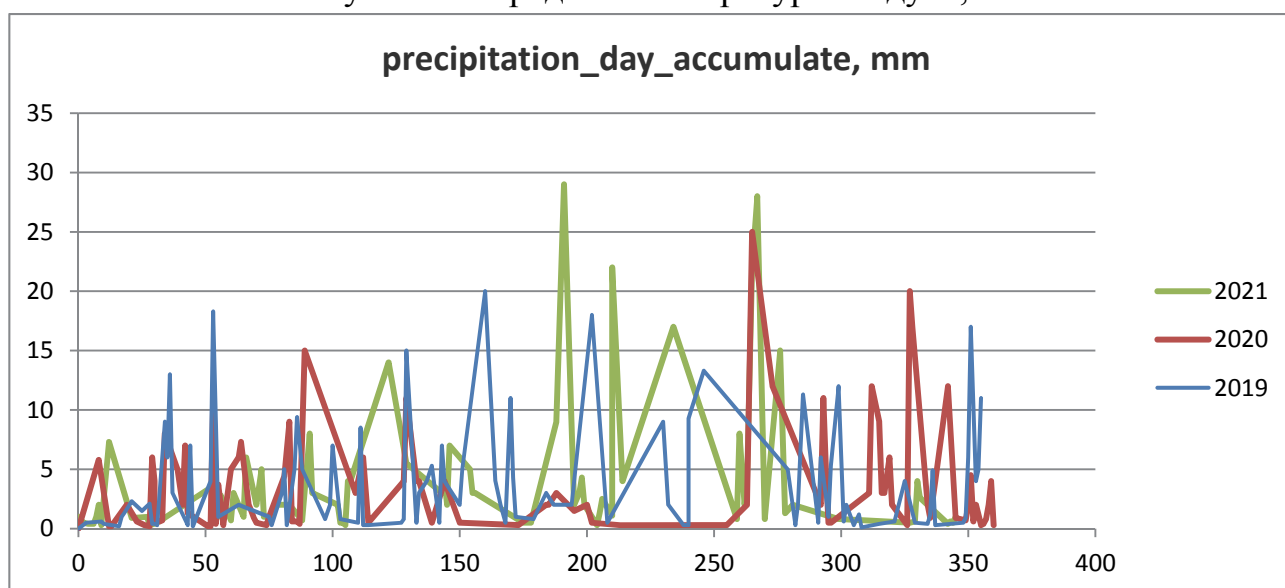


Рисунок 2 – Суммарные дневные осадки, мм

После добавления в таблицу двух строк, соответствующим нулевым осадкам, используемые данные представлены на рисунке 2. Также представлены графики накопленных осадков с масштабом 1/10.

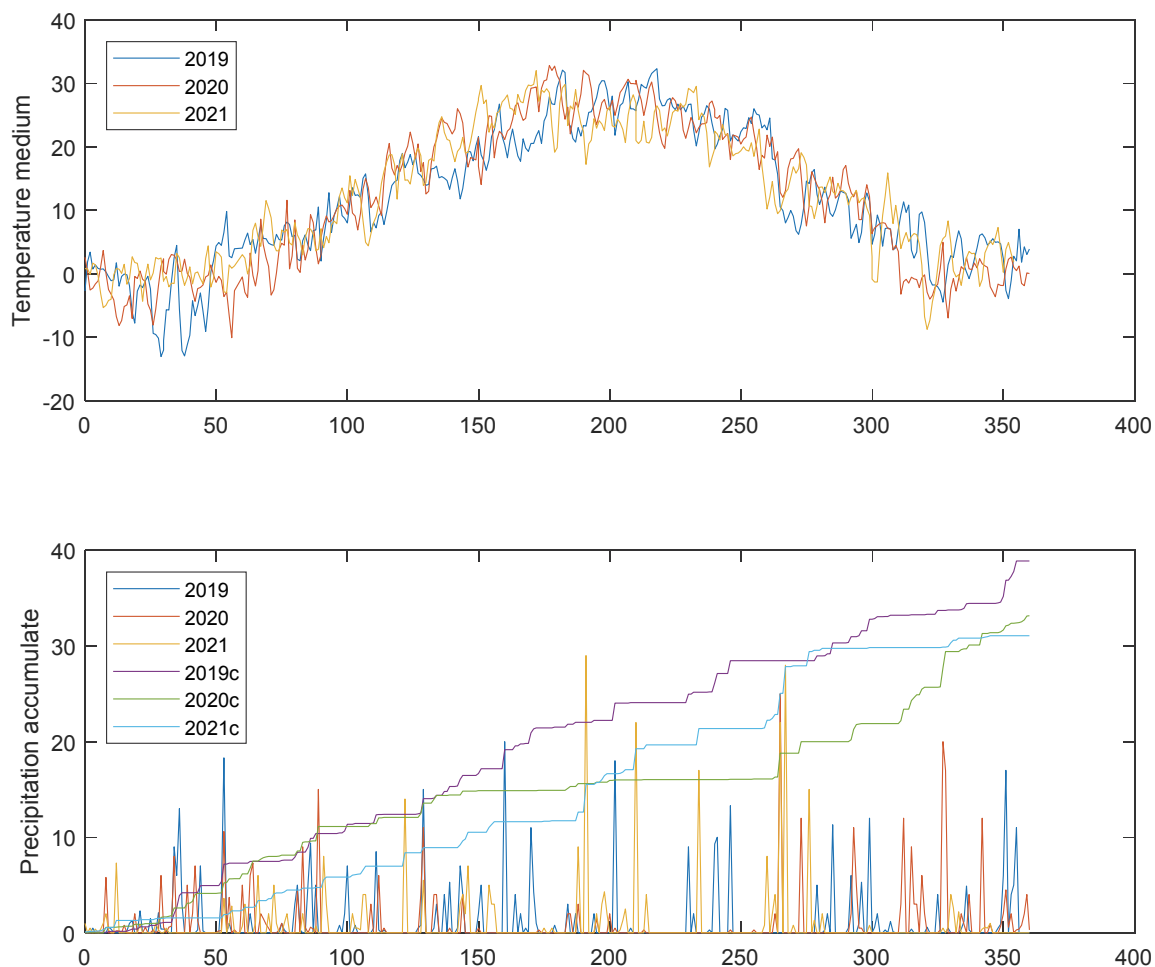


Рисунок 3 – Суммарные дневные осадки, соответствующим нулевым осадкам, мм

В работе для построения модели прогнозирования пастбищного плодородия использовалось отклонение наблюдаемых факторных признаков от их осредненных по годам наблюдения изменений. Такие отклонения в конкретно взятом году содержат, очевидно, климатические особенности данного года, которые и следует использовать для прогноза.

Для определения адекватной модели изменения температуры в течение года рассматривались модельные регрессии в виде тригонометрических рядов 1-го, 2-го и 3-го порядков, а также модели скользящего среднего (smooth) с

различными периодами осреднения. Графическое представление некоторые из моделей представлено на рисунке 3.

Результаты параметризации модели 2-го порядка представлены ниже:

General model:		sse: 5.0278e+03
$T_{fit17} \cos_2(t) = C + k_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (t+t_1)/T_1) + k_2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (t+t_2)/T_2)$		rsquare: 0.8782
Coefficients (with 95% confidence bounds):		dfе: 358
C = 11.27 (9.314, 13.22)		adjrsquare: 0.8761
T1 = 372.1 (321.4, 422.7)		rmse: 3.7475
T2 = 166.2 (134.6, 197.8)		
k1 = 14.34 (13.28, 15.4)		
k2 = 1.603 (0.6609, 2.545)		
t1 = 171.4 (120.3, 222.5)		
t2 = 120 (51.3, 188.7)		

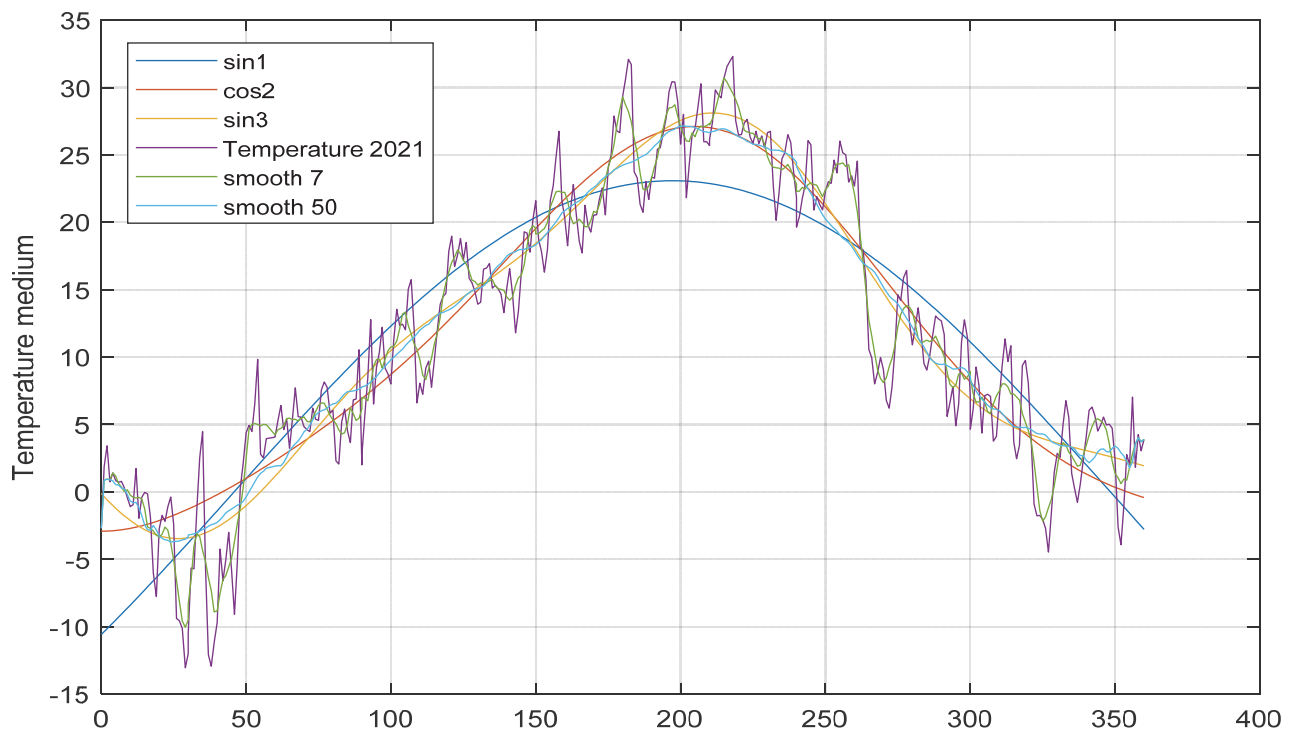


Рисунок 4 – Модели изменения температуры

Эти результаты, а также соответствующие графики на рисунке 4, не позволяют признать их удовлетворительными для рассматриваемой задачи.

Более адекватным описанием наблюдаемого процесса в среднем представляются модели скользящего среднего и тригонометрическая модель третьего порядка, которые и использовались в дальнейшем.

На рисунке 5 представлены модели для трех реализаций процесса изменения температуры, а также графики искомых сглаженных отклонений от

средней тенденции – $dTemperature$. Эти отклонения отражают климатические особенности рассматриваемого года и будут использованы в дальнейшем для прогноза пастбищного плодородия.

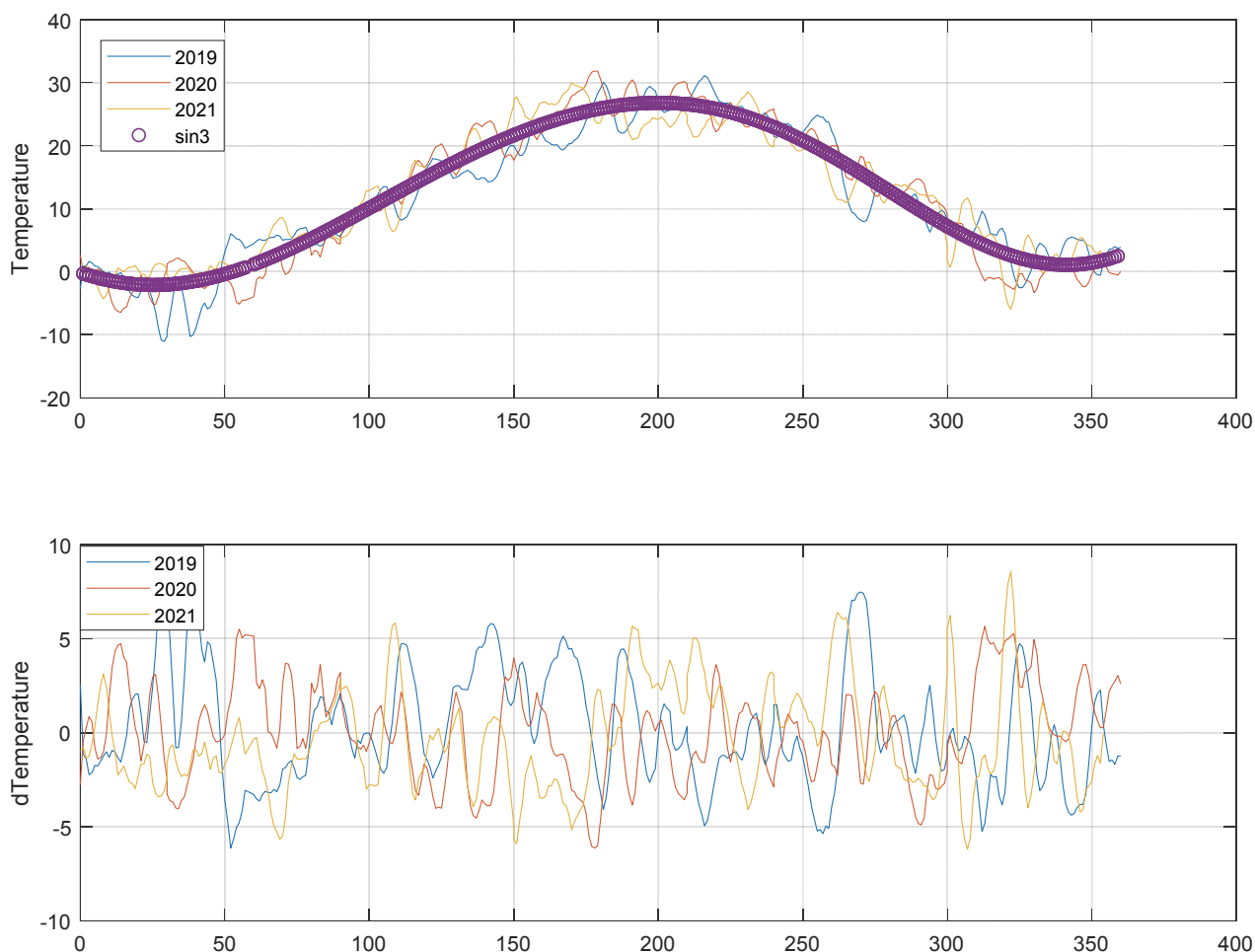


Рисунок 5 – Модели изменения температуры и сглаженных отклонений

Исследование временных рядов дневных осадков не выявило наличие линейных трендов и циклических составляющих. Поэтому в качестве регрессионной модели используется среднее значение осадков за несколько лет.

На рисунке 6 представлены модель осадков и сглаженные на интервале 9 дней осадки за три года.

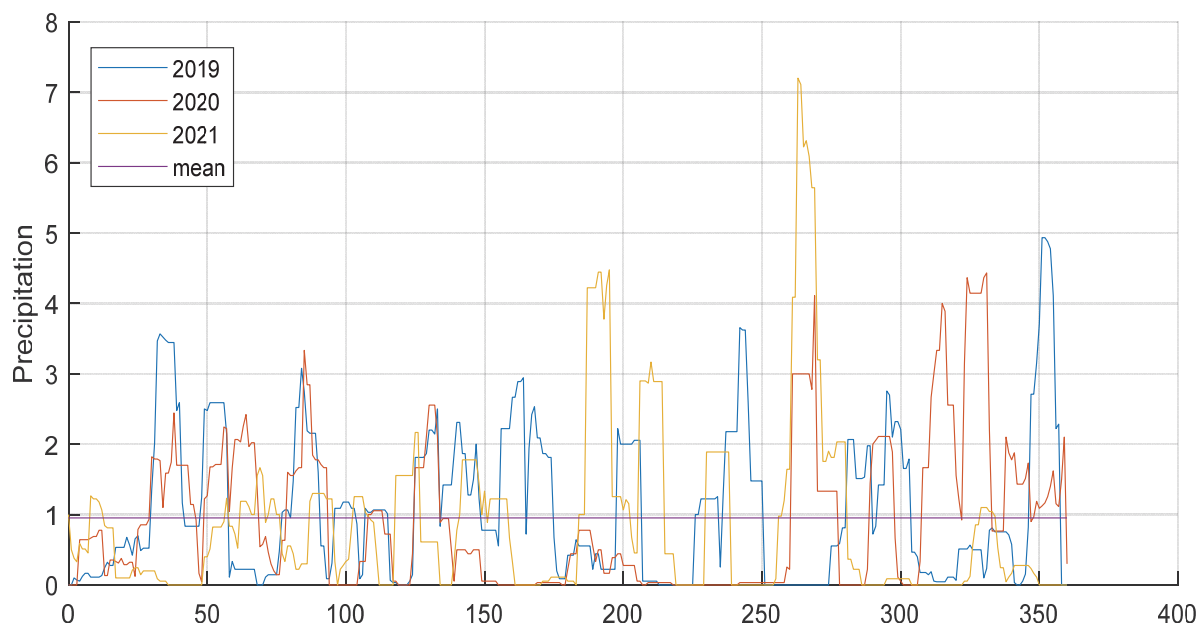


Рисунок 6 – Модели изменения дневных осадков, мм

На рисунке 7 представлены линейная регрессионная модель накопленных осадков, кумуляты осадков за три рассматриваемых года, а также отклонения значений кумулят от тренда.

Отклонения уровней осадков от модельных значений также отражают климатические особенности рассматриваемого года и должны быть использованы для построения прогнозной модели пастбищного плодородия.

Дальнейшее использование имеющихся данных по температуре и осадкам, которые отражают климатические особенности рассматриваемого года, основано на следующих предположениях.

Пастбищное плодородие будет ниже среднего, если факторы температуры и осадков будут проявляться в противофазе. То есть, будет слишком много влаги при отсутствии тепла, или же наоборот, испепеляющая жара при отсутствии необходимой влаги.

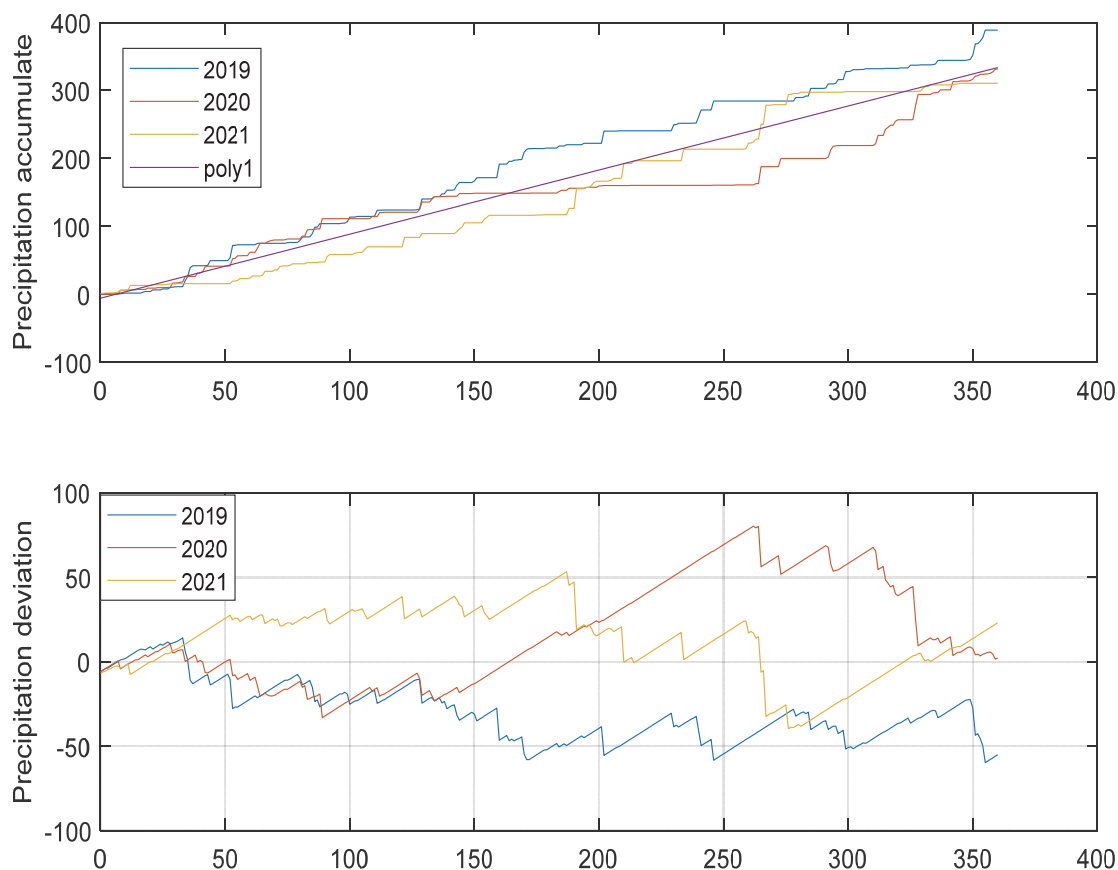


Рисунок 7 – Модели изменения накопленных осадков и их отклонений, мм

Пастбищное плодородие будет выше среднего в рассматриваемом году, если растениям будет достаточно и влаги и тепла, т.е. факторные признаки изменяются синфазно.

Указанное предположение позволяет в качестве обобщающего факторного признака y использовать интеграл произведения отклонений температуры и уровня осадков от своих средних для данного периода времени значений (приложение Б, В)

$$y = \int_{t_0}^{t_k} (Tm - Tt)(Pm - Pt)dt, \quad (1)$$

где: Tm и Tt - модельное и наблюдаемое значения температуры; Pm и Pt - модельное и наблюдаемое значения уровней осадков (precipitation).

Графики произведений отклонений температуры и уровня осадков от своих средних для данного периода времени значений, а также их интегралов для трех лет представлены на рисунке 8.

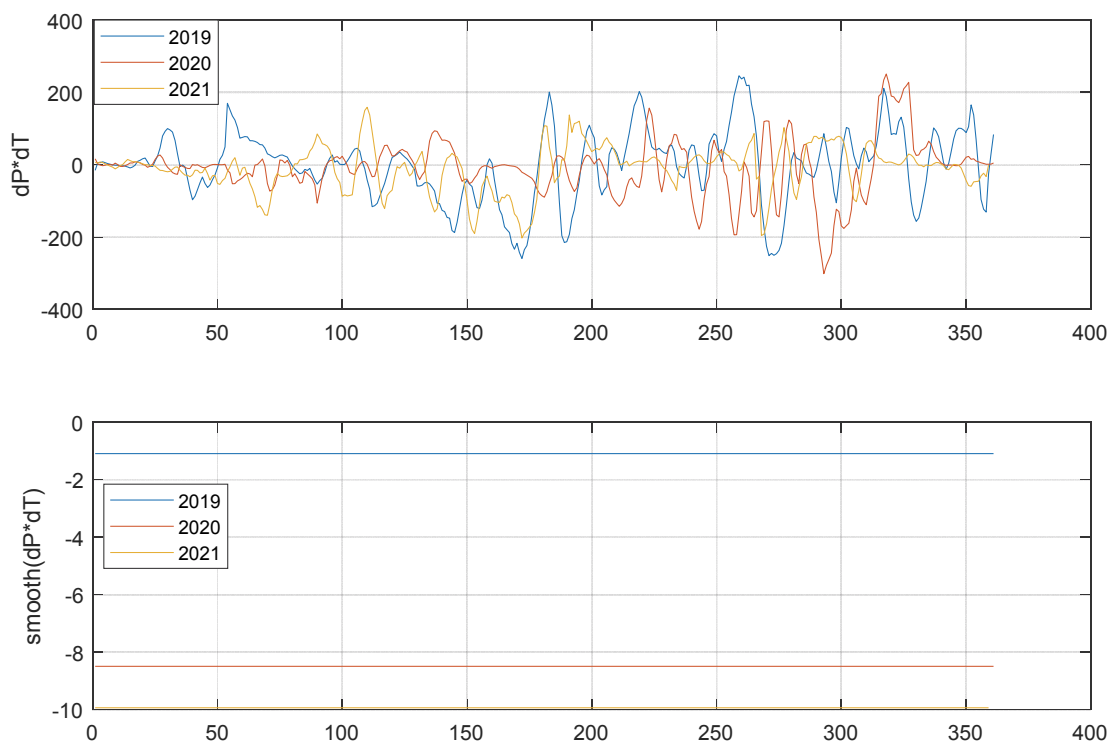


Рисунок 8 – Произведений отклонений Т и Р и их интегралы

Для решения поставленной задачи по разработке математической модели для прогноза пастбищного плодородия использовали вегетационный индекс NDVI (рис.9).

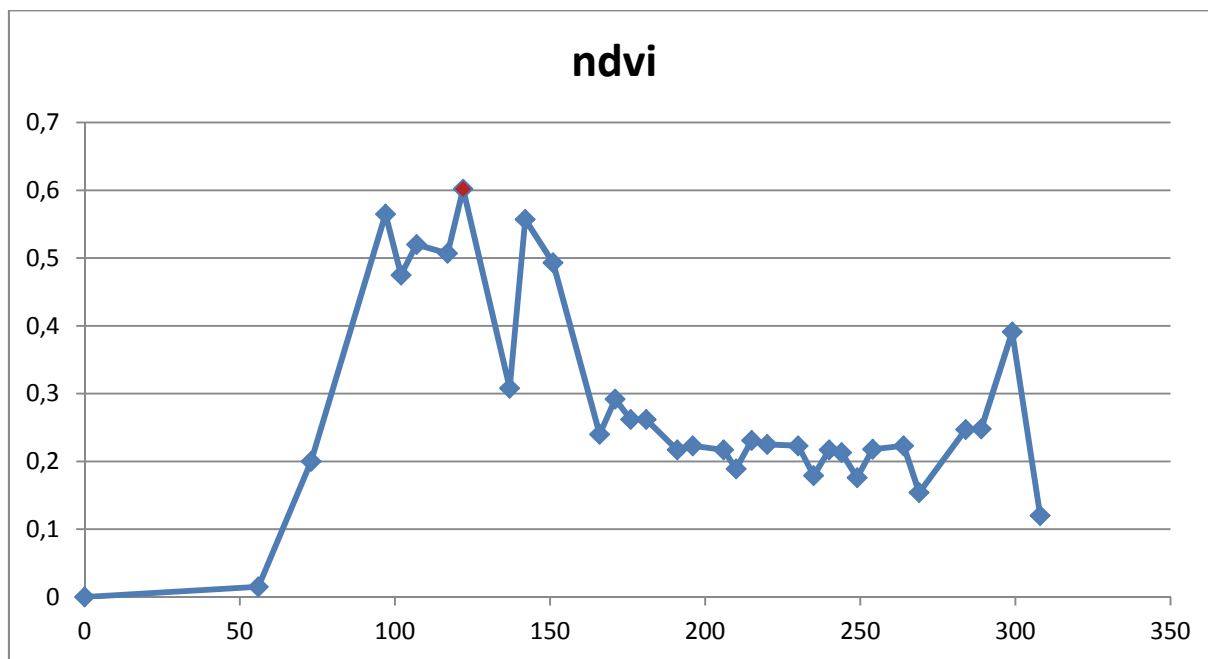


Рисунок 9- Здесь по оси ОХ – время в днях. Начало отсчета – 01.01.2022г.

На первом этапе пробовали получить модель прогноза индекса NDVI по имеющимся на текущий момент измерениям. Данные NDVI представляют собой временной ряд с выраженными сезонными особенностями в виде одного или двух максимумов. Необходимо спрогнозировать параметры этого максимума - положение на временной оси, ширину, амплитуду и его форму.

Используя различные модельные регрессии на имеющемся временном интервале, удастся получить модели, например, в виде рациональной и полиномиальной функций (рис. 10).

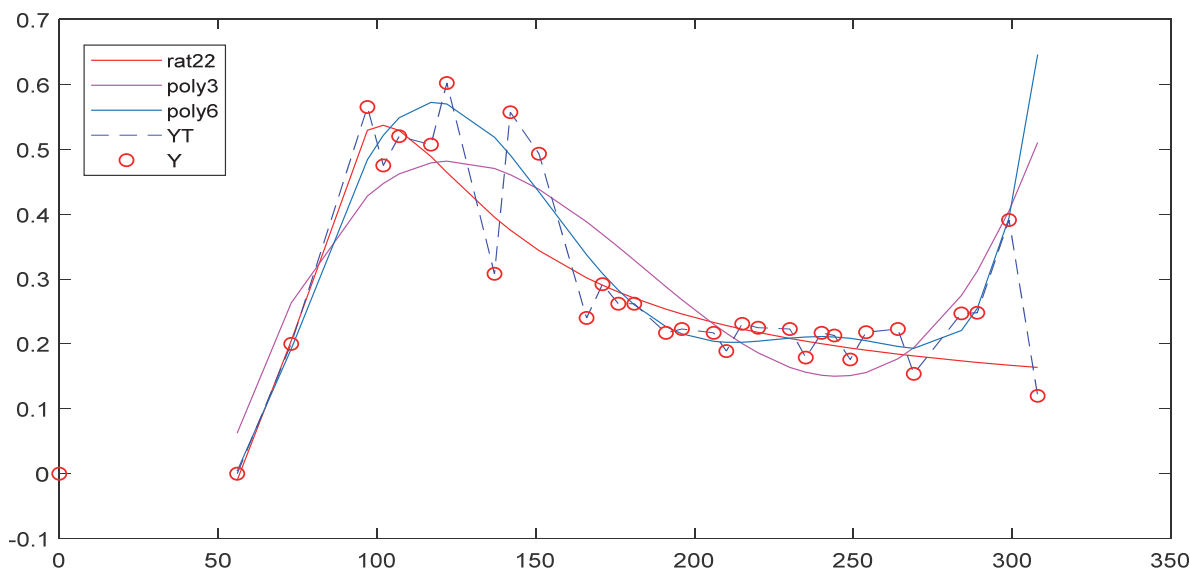


Рисунок 10 - Рациональная и полиномиальная функция

Linear model Poly6:	sse: 0.0933
$f_{poly6}(x) = p1*x^6 + p2*x^5 + p3*x^4 + p4*x^3 + p5*x^2 + p6*x + p7$	rsquare: 0.8588
where x is normalized by mean 193.8 and std 68.92	dfe: 25
Coefficients (with 95% confidence bounds):	adjrsquare: 0.8250
p1 = 0.05506 (0.02669, 0.08342)	rmse: 0.0611
p2 = 0.07389 (0.03773, 0.1101)	
p3 = -0.2473 (-0.3757, -0.1189)	
p4 = -0.109 (-0.231, 0.01298)	
p5 = 0.353 (0.196, 0.5101)	
p6 = -0.1487 (-0.241, -0.05632)	
p7 = 0.2201 (0.1758, 0.2644)	
Linear model Poly3:	sse: 0.2134
$f_{poly3}(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4$	rsquare: 0.6772
where x is normalized by mean 193.8 and std 68.92	dfe: 28
Coefficients (with 95% confidence bounds):	adjrsquare: 0.6426
p1 = 0.1209 (0.08919, 0.1527)	rmse: 0.0873
p2 = 0.05048 (0.01627, 0.0847)	
p3 = -0.275 (-0.3447, -0.2054)	

p4 =	0.277 (0.2323, 0.3216)	
frat22(x) =	(p1*x^2 + p2*x + p3) / (x^2 + q1*x + q2)	sse: 0.1176
Coefficients (with 95% confidence bounds):		rsquare: 0.8220
p1 =	0.0819 (0.04805, 0.1158)	dfe: 28
p2 =	4.021 (-0.4181, 8.461)	adjrsquare: 0.8030
p3 =	-500 (fixed at bound)	rmse: 0.0648
q1 =	-164.7 (-185.2, -144.3)	
q2 =	7819 (5723, 9916)	

В левой части представлены уравнения моделей, оптимальные по методу наименьших квадратов значения их параметров, а также в скобках, 95% доверительные интервалы значений этих параметров.

В правой части:

sse - сумма квадратов ошибок регрессии;

rsquare – коэффициент детерминации (R^2);

dfe – число степеней свободы ошибок регрессии;

adjrsquare – исправленный коэффициент детерминации (R_{adj}^2);

rmse – среднеквадратическая ошибка регрессии.

При этом видно, что из приведенных моделей статистически значимыми (с надежностью 95%) параметрами обладает только полиномиальная модель 3-го порядка. Аналогичный результат получается и для других, так называемых пользовательских моделей.

Если же ограничивать справа временной интервал, имитируя ограниченность наблюдений для задач прогноза, то получить сколь-нибудь значимую модель и вовсе становится невозможным. Это утверждение соответствует известному требованию к объему статистических данных – на каждый оцениваемый параметр модели должно приходиться не менее 10 независимых наблюдений.

Как один из возможных вариантов выхода из ситуации, можно предложить не совсем методически правильный способ. Попробуем сгенерировать зависимые от имеющихся «наблюдения», например, с помощью кусочно-линейной интерполяции. На следующем рисунке такие «наблюдения» показаны синими звездочками (рис. 11).

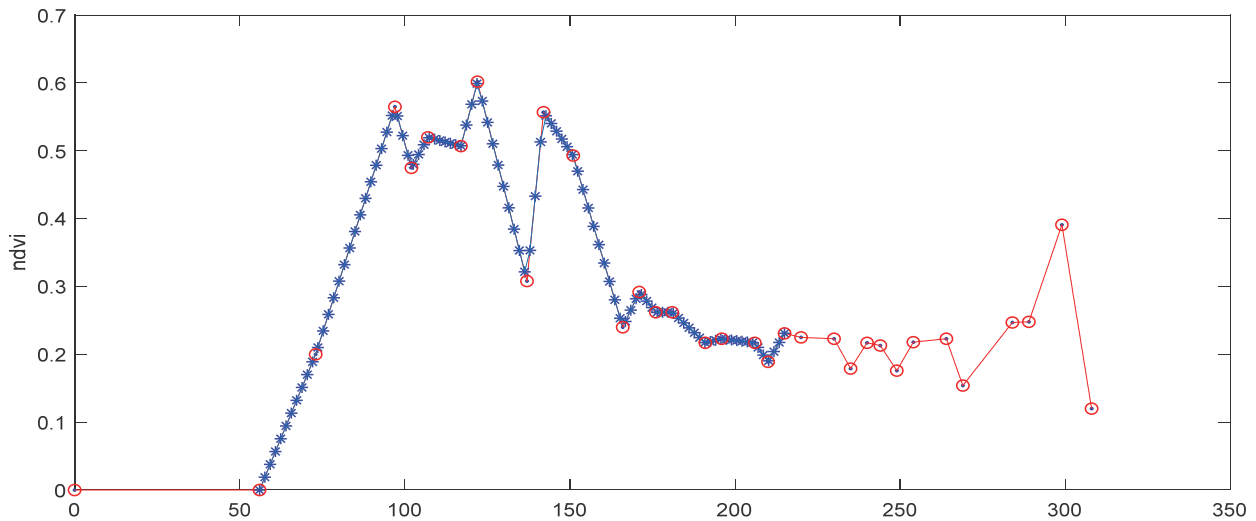
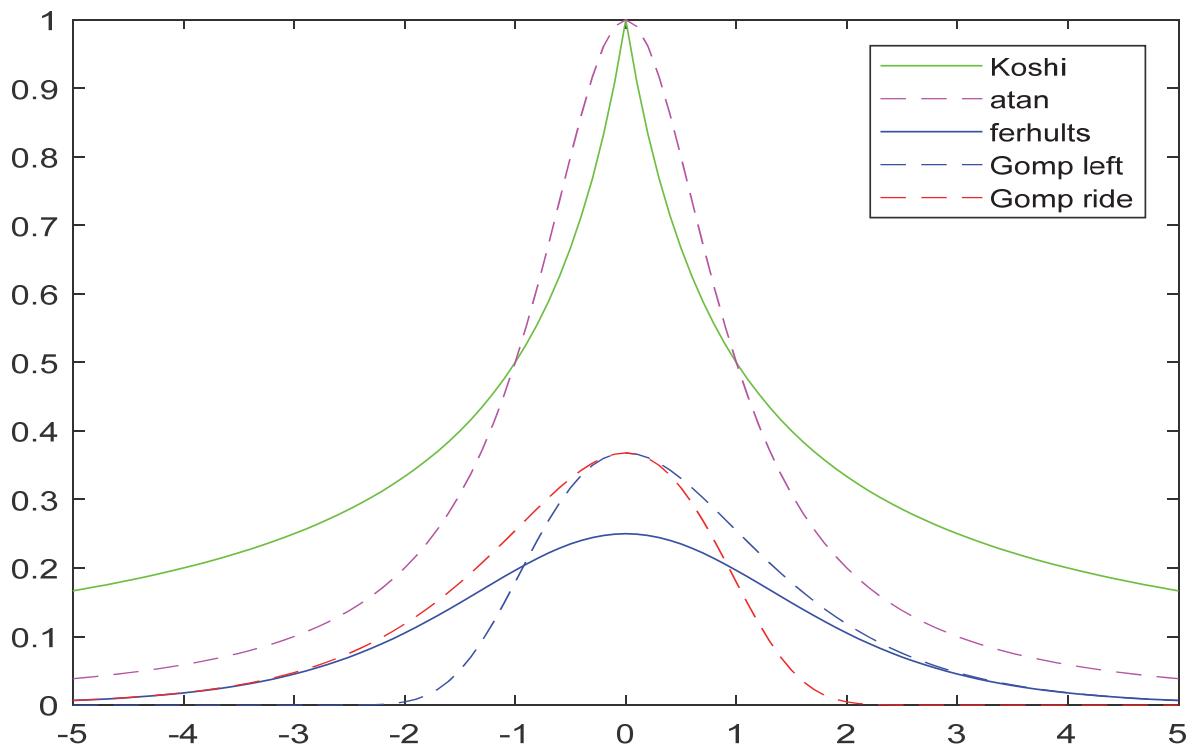


Рисунок 11 – Сгенерированные наблюдения с помощью кусочно-линейной интерполяции

В качестве модельных, помимо выше представленных рациональных и полиномиальных, использовались следующие функции с характерным импульсным поведением: Коши, $\text{arctg}(x)$, дифференциальные функции (производные) Ферхюльста, Гомпертца с левой и правой асимметрией, а также сумма f_s и произведение f_p логистических функций Ферхюльста (рис. 12).



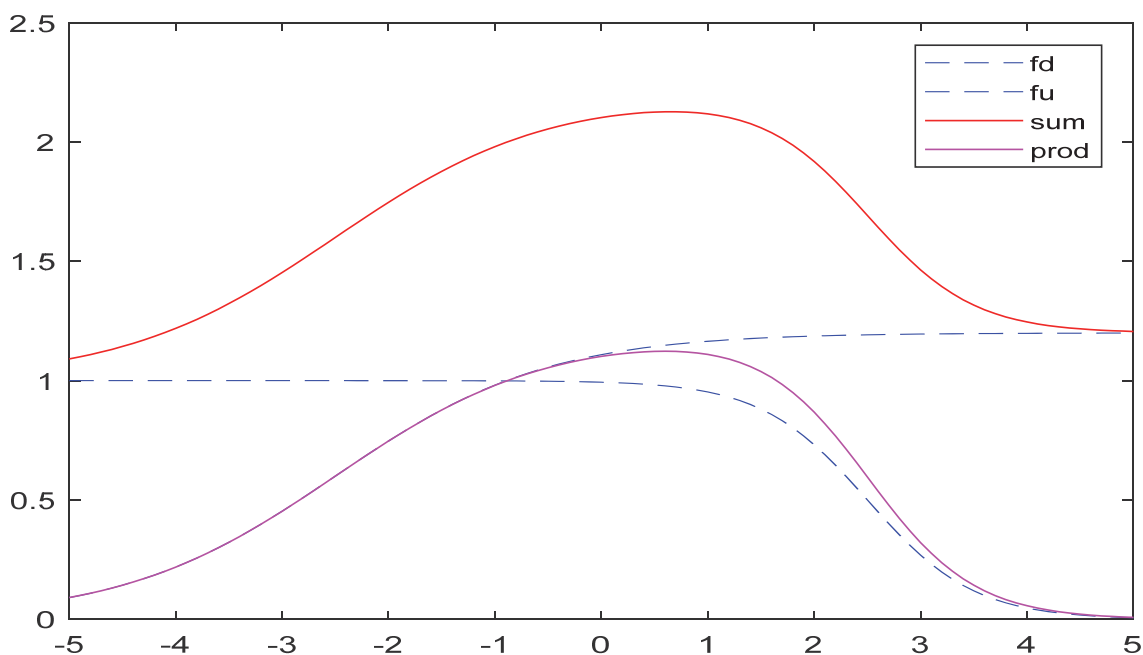


Рисунок 12 - дифференциальные функции (производные) Ферхюльста, Гомпертца с левой и правой асимметрией, а также сумма f_s и произведение f_p логистических функций Ферхюльста

Из всех вариантов на интервале оценивания дней или [25.02.2021, 29.06.2021] «лучшей» оказалась модель в виде суммы логистических функций Ферхюльста с 7-ю оцениваемыми параметрами (рис. 13).

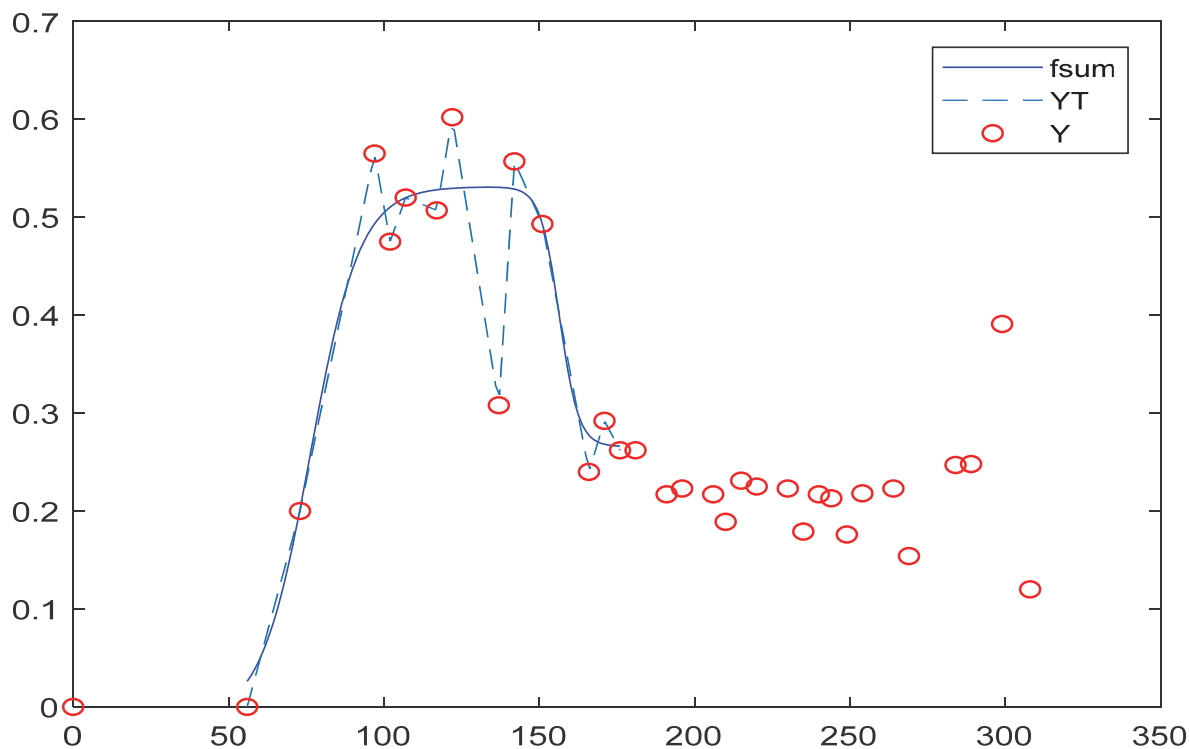


Рисунок 13 - Логистическая функция Ферхюльста с 7-ю оцениваемыми параметрами

$fs(t) = C + kd / (1 + \exp(md * (t - t0d))) + ku / (1 + \exp(-mu * (t - t0u)))$	sse: 0.1018
Coefficients (with 95% confidence bounds):	rsquare: 0.9573
C = -0.2782 (-0.3469, -0.2096)	dfe: 93
kd = 0.2654 (0.2371, 0.2936)	adjrsquare: 0.9545
ku = 0.544 (0.481, 0.607)	rmse: 0.0331
md = 0.3258 (0.1908, 0.4609)	
mu = 0.1258 (0.09932, 0.1523)	
t0d = 156.5 (155, 158)	
t0u = 76.39 (74.01, 78.77)	

Видно, что все параметры являются статистически значимыми, а исправленный коэффициент детерминации достаточно большой: 0.9545.

Однако, и в этом случае для параметризации модели необходимы наблюдения «на спаде» временного ряда – 150-180 дни от начала года или 30.05.2021 - 29.06.2021.

Полученные результаты подтверждают ранее сделанные выводы о том, что прогнозирования пастбищного плодородия недостаточно располагать данными только текущего периода года, поскольку для засушливых зон, например, Ставропольского края, особое значение имеют также и осадки, выпавшие в зимний период.

Таким образом, проведение математической обработки дистанционно полученных данных и визуальной оценки состояния пастбищ, а именно корреляционные взаимосвязи между результатами телеметрии и спектральных характеристик и фактических данных плодородия почв, биологической продуктивности пастбищ, состояния пастбищных животных, численность и состава поголовья пастбищных животных, можно составить технологическую карту выпаса животных, что позволит повысить приросты живой массы животных и повысить эффективность пастбищного животноводства.

2. Построение прогностических математических моделей состояния пастбищных территорий, эффективности ведения пастбищного животноводства

Современный, инновационный подход к развитию животноводства должен обеспечить большую предсказуемость конечного результата, информационную поддержку в принятии обоснованных управленческих решений, снижение в среднем возможных рисков, и в конечном итоге – рост производительности труда в этой важной для страны сфере.

Наличие современных информационно-измерительных систем воздушно-космического мониторинга пастбищ, а также соответствующих информационных технологий требуют дальнейшего совершенствования прогностических математических моделей, как продуктивности пастбищ, так и продуктивных качеств пастбищных животных.

При прочих равных, указанные характеристики в оперативном временном масштабе определяются, в основном, погодно-климатическими условиями.

Рассмотрим возможность создания модели прогноза биологической продуктивности пастбища и питательной ценности получаемых с него кормов от температурной траектории сезона, количества выпавших осадков, а также от регистрируемых с помощью спутников уровней нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized difference vegetation index).

Рассмотрим статистическую модель, где в качестве факторных признаков используются:

- индекс NDVI;
- температура воздуха, град. Цельсия;
- накопленное количество осадков, мм.

В качестве результативных признаков будем использовать:

- биологическую продуктивность пастбища, т/га;
- питательная ценность корма, ц корм.ед./га;
- живую массу баранчиков, кг;

— живую массу ярочек, кг.

Модели для пастбищных участков СПК «Племзавод Вторая пятилетка» Ставропольского края.

В графическом виде динамика изменений рассматриваемых параметров представлена на рисунках 14-18. На рисунках по оси ОХ откладывается время в днях от начала 2022 года. Дискретные наблюдаемые значения признаков соединены прямыми линиями для большей наглядности.

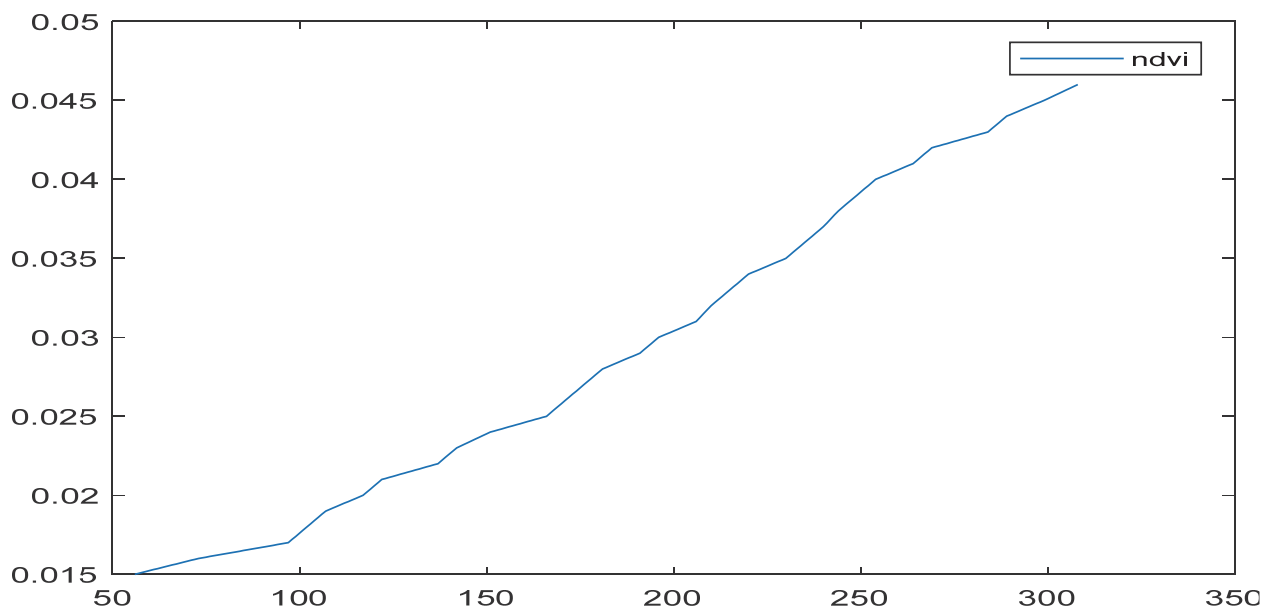


Рисунок 14 – Годовая динамика вегетационного индекса (NDVI)

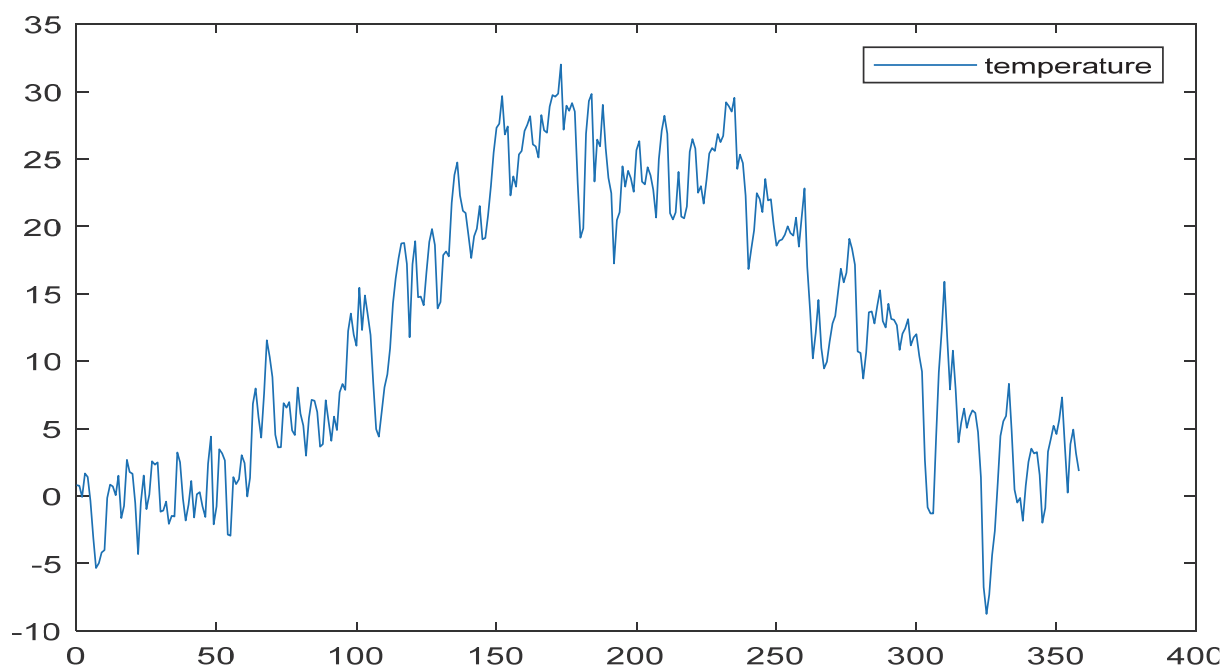


Рисунок 15 – Годовая динамика среднесуточной температуры воздуха, С°

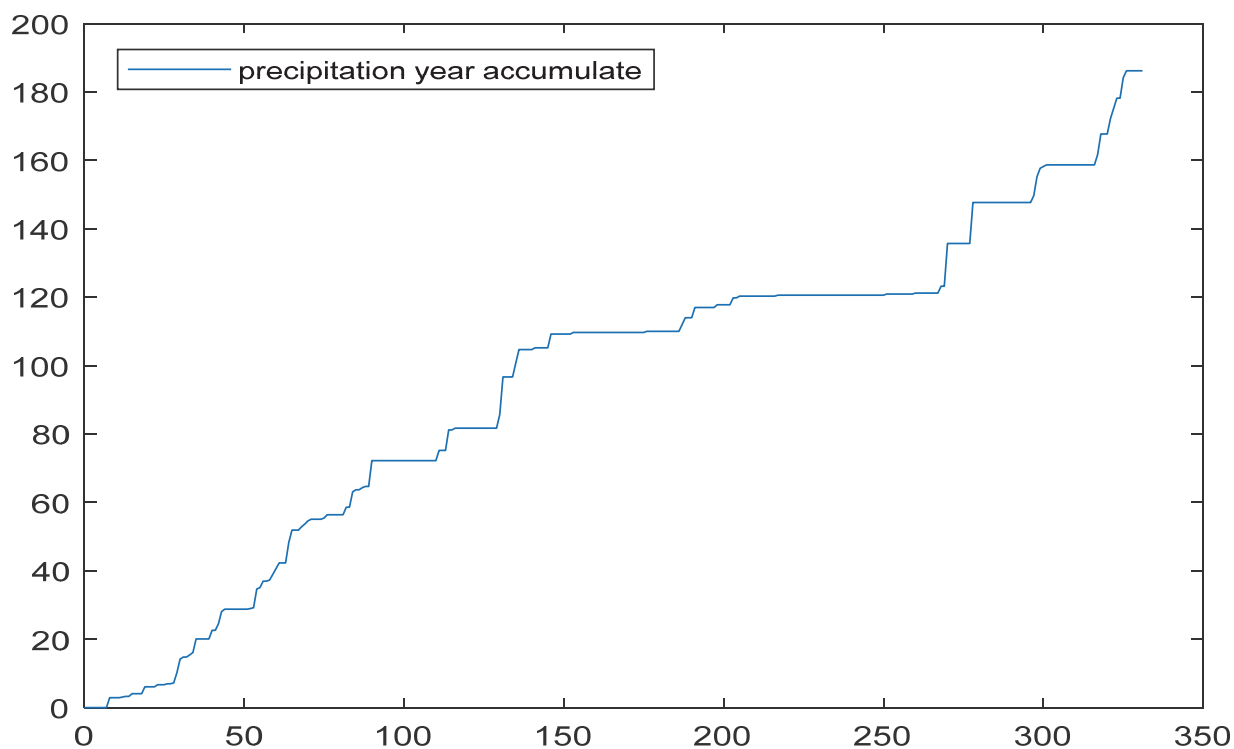


Рисунок 16 – Годовая динамика накопления количества осадков, мм

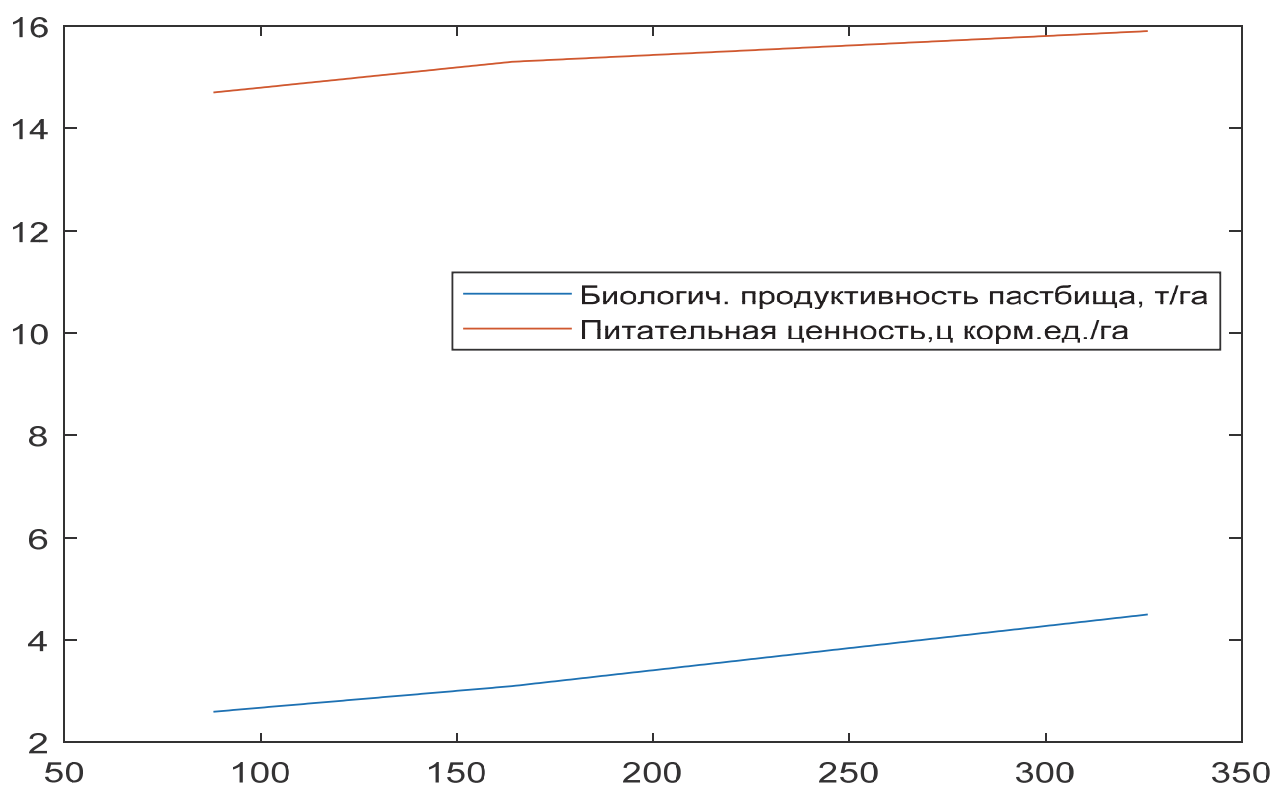


Рисунок 17 – Годовая динамика биологической продуктивности пастбища, т/га и
Динамика питательной ценности корма, ц корм. ед./га

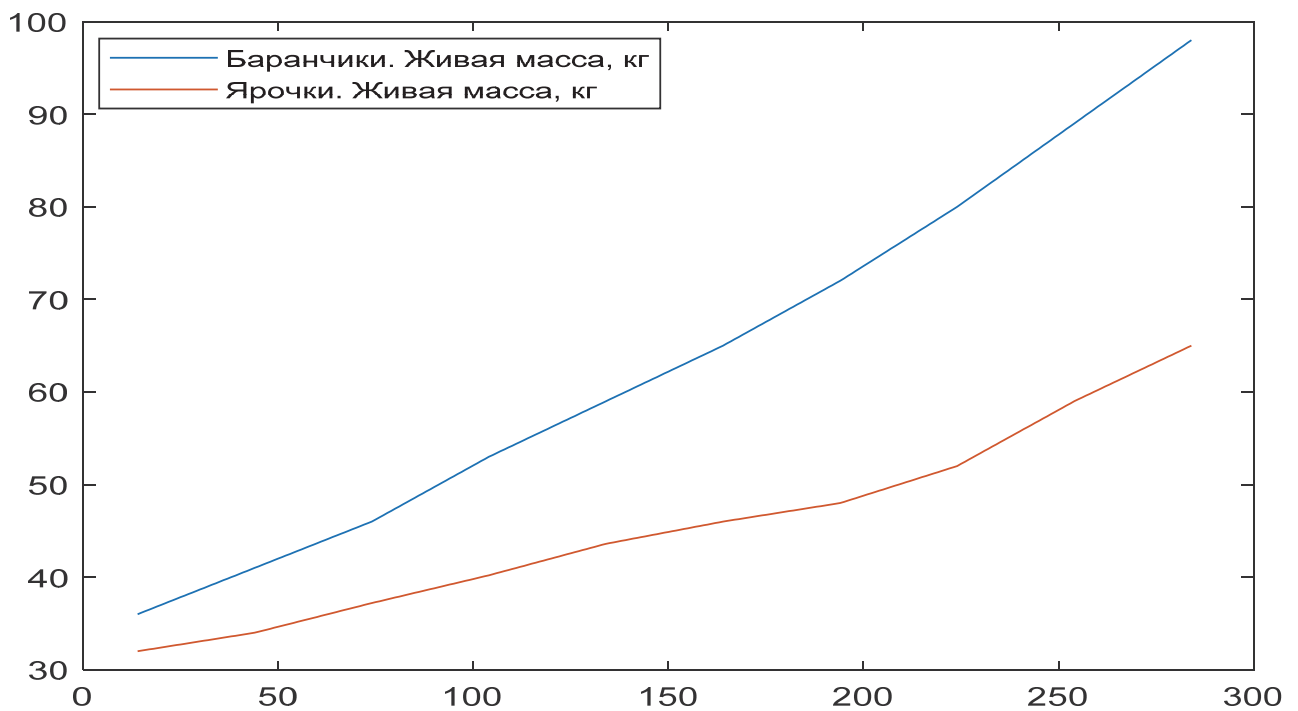


Рисунок 18 – Годовая динамика прироста живой массы баранчиков и ярочек, кг

Предобработка векторов результативных признаков выполнялась с помощью линейной интерполяции, в результате которой они были дополнены значениями для каждого дня внутри интервала наблюдения.

Предобработка векторов факторных признаков, наоборот, сводилась, в основном, к их редуцированию, чтобы согласовать временные интервалы наблюдений.

Модель для оценивания живой массы баранчиков:

$$Y_b = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3, \quad (3)$$

где Y_b - живая масса баранчика, кг;

x_1, x_2, x_3 – значения индекса NDVI, температуры и накопленного количества осадков соответственно;

b_0 - b_3 – оцениваемые параметры модели.

Ниже представлены характеристики оценок параметров модели.

Estimated Coefficients:

Estimate	SE	tStat	pValue	
b0	22.366	0.31508	70.984	2.4266e-175
b1	1747.8	37.254	46.915	5.9518e-131
b2	0.052517	0.026953	1.9484	0.05241
b3	-0.028443	0.013514	-2.1047	0.036249

Number of observations: 271, Error degrees of freedom: 267

Root Mean Squared Error: 2.03

R-squared: 0.987, Adjusted R-Squared 0.987

F-statistic vs. constant model: 6.85e+03, p-value = 3.28e-252

Модель для оценивания живой массы ярочек:

$$Y_j = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3, \quad (4)$$

где Y_j - живая масса ярочки, кг;

x_1, x_2, x_3 – значения индекса NDVI, температуры и накопленного количества осадков соответственно;

b_0 - b_3 – оцениваемые параметры модели.

Ниже представлены характеристики оценок параметров модели.

Estimated Coefficients:

Estimate	SE	tStat	pValue	
b0	24.691	0.20738	119.06	2.0761e-233
b1	883.41	24.52	36.028	1.5837e-104
b2	-0.072435	0.01774	-4.0831	5.8773e-05
b3	0.0014821	0.0088948	0.16662	0.86779

Number of observations: 271, Error degrees of freedom: 267

Root Mean Squared Error: 1.34

R-squared: 0.978, Adjusted R-Squared 0.978

F-statistic vs. constant model: 3.99e+03, p-value = 2.54e-221

Качество этих моделей также достаточно высокое. Скорректированные коэффициенты детерминации (Adjusted R-Squared) этих моделей составляют, как видно из отчетов, 0.987 и 0.978 соответственно.

На рисунке 19 представлены зависимости истинных и оцененных с помощью моделей значений живой массы баранчиков и ярочек. Среднеквадратические ошибки оценивания составляют 2.03 и 1.34 кг соответственно.

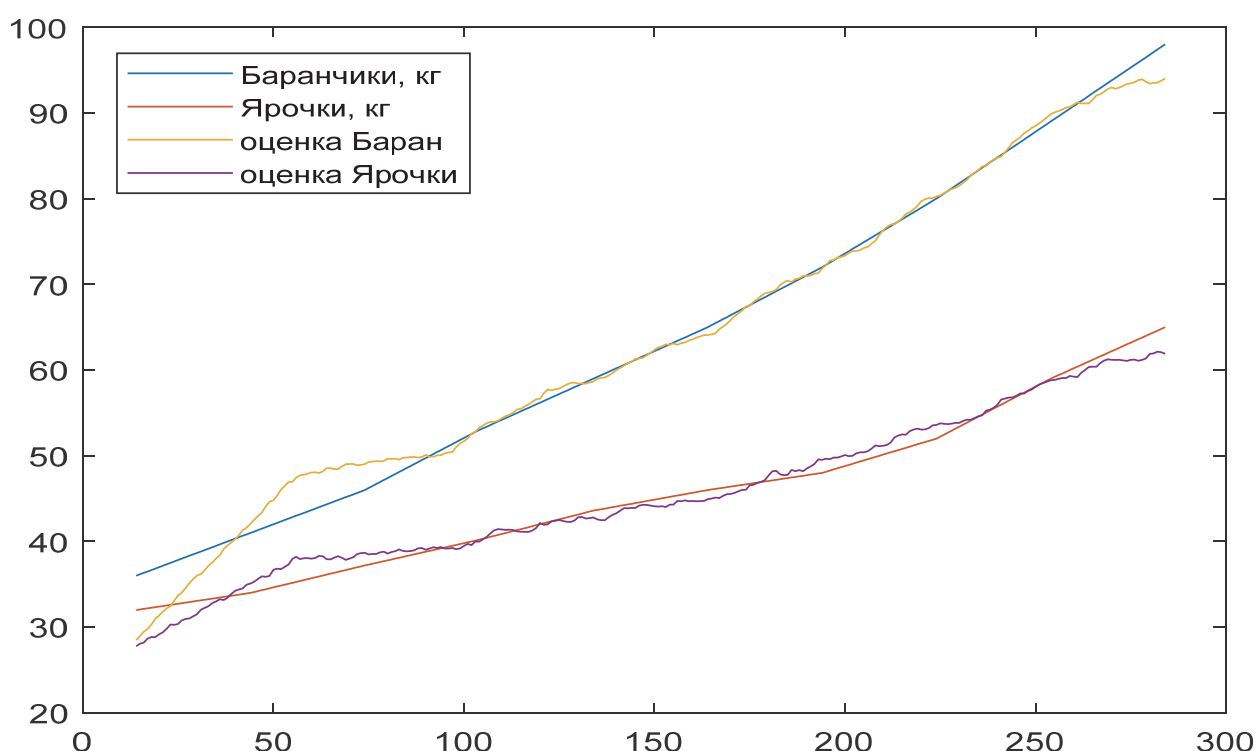


Рисунок 19– Динамика живой массы баранчиков, ярочек и их оценки, кг

Модели продуктивных показателей пастбищ и пастбищных животных, рассмотренные выше для племенного хозяйства Ставропольского края, как видно из приведенных оценок, в достаточной степени адекватны моделируемым параметрам.

Интенсивность роста и развития пастбищных животных в значительной степени определяется состоянием и развитием пастбищных кормовых растений, климатическими параметрами и генетически обусловленной способностью

конверсии кормовых веществ в питательные части тела животных. В наших исследованиях использовались высокопродуктивные генотипы мериносовых пород овец, сочетающих способность к интенсивному развитию в условиях естественных пастбищ, энергия роста молодняка достигает прироста 150-200 грамм живой массы за сутки. Эти животные отселекционированы для эффективного выращивания в условиях суровых климатических факторов Ставропольского края и Казахстана. Продуктом от выращивания овец мериносовых пород является высококачественная шерсть, мясо (баранина), шкуры. Поэтому, важным элементом повышения эффективности пастбищного содержания овец мериносовых пород является разработка и внедрение производственных моделей получения продукции животноводства [6].

Таким образом, стоит отметить, что параметры моделей существенно зависят от географического расположения пастбищного участка и климатических особенностей рассматриваемого сезона. Использование выборочных данных большего объема, возможно, потребует построения более сложных, например, нелинейных моделей множественной регрессии.

3. Разработка методики прогнозирования биологической продуктивности пастбищных угодий и оптимизации технологической нагрузки для различных половозрастных групп пастбищных животных на основе применения корреляционных соответствий между спектральными характеристиками, полученными по результатам дистанционной телеметрии и фактическими производственными данными

Предобработка векторов факторных признаков, наоборот, сводилась, в основном, к их редуцированию, чтобы согласовать временные интервалы наблюдений. Рассмотрим статистическую модель линейной структуры, как наиболее простую.

Используя метод наименьших квадратов для параметризации линейных моделей множественной регрессии получим следующие модели.

Модель биологической продуктивности пастбища СПК «Племзавод Вторая Пятилетка»

$$Y_{bpr} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3, \quad (5)$$

где Y_{bpr} - биологическая продуктивность пастбища, т/га;

x_1, x_2, x_3 – значения индекса NDVI, температуры и накопленного количества осадков соответственно;

b_0 - b_3 – оцениваемые параметры модели.

Ниже представлены характеристики оценок параметров модели.

Estimated Coefficients:

	Estimate	SE	tStat	pValue
b_0	0.79835	0.059494	13.419	2.7027e-30
b_1	-0.4576	0.055175	-8.2936	1.1543e-14
b_2	0.014826	0.00077282	19.185	1.2536e-48
b_3	0.0058482	0.00022229	26.309	1.9266e-69

Number of observations: 221, Error degrees of freedom: 217

Root Mean Squared Error: 0.0662

R-squared: 0.933, Adjusted R-Squared 0.932

F-statistic vs. constant model: 1.01e+03, p-value = 3.13e-127

Здесь использованы следующие обозначения:

Estimate – собственно оценки параметров модели. Их единицы измерения обеспечивают пересчет значений из единиц факторных признаков в результативный;

SE – стандартная ошибка оценки параметра;

tStat и pValue – аргумент и значение t-статистики Стьюдента при условии, что ошибки наблюдений являются нормально распределенными.

***Модель динамики питательной ценности корма СПК «Племзавод
Вторая Пятилетка»***

$$Y_{pc} = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + b_3 * x_3, \quad (6)$$

где Y_{pc} - питательная ценность, ц корм.ед./га;

x_1, x_2, x_3 – значения индекса NDVI, температуры и накопленного количества осадков соответственно;

b_0 - b_3 – оцениваемые параметры модели.

Характеристики оценок параметров модели (Estimated Coefficients):

	Estimate	SE	tStat	pValue
b_0	20.271	0.28438	71.28	1.525e-152
b_1	2.0224	0.26374	7.6682	5.7932e-13
b_2	-0.072874	0.003694	-19.728	2.6442e-50
b_3	-0.026629	0.0010625	-25.062	5.4091e-66

Number of observations: 221, Error degrees of freedom: 217

Root Mean Squared Error: 0.316

R-squared: 0.929, Adjusted R-Squared 0.928

F-statistic vs. constant model: 940, p-value = 5.48e-124

Из приведенных характеристик моделей следует, что модели являются достаточно качественными, с точки зрения оценки продуктивности пастбища по наблюдаемым факторным признакам. Все параметры моделей являются статистически значимыми. Скорректированные коэффициенты детерминации (Adjusted R-Squared) этих моделей составляют, как видно из отчетов, 0.932 и 0.928 соответственно.

На рисунке 20 представлены зависимости истинных и оцененных с помощью моделей значений результативных признаков. Среднеквадратические ошибки оценивания составляют 0.0662 т/га и 0.316 ц корм.ед./га соответственно.

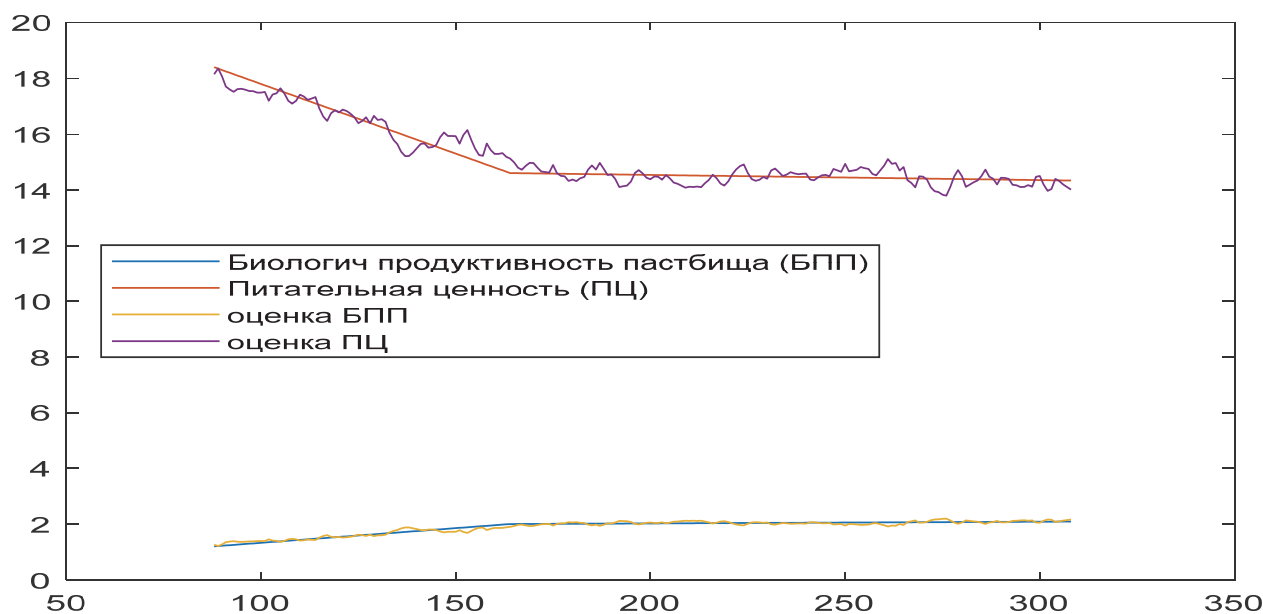


Рисунок 20 – Показатели продуктивности пастбища и их оценки

Аналогично выше рассмотренному были получены модели.

Рассмотрим статистическую модель линейной структуры, как наиболее простую. Используя метод наименьших квадратов для параметризации линейных моделей множественной регрессии получим следующие модели.

На рисунках 21-23 представлены частные регрессии оцениваемого параметра – биологической продуктивности пастбища от каждого предиктора в отдельности.

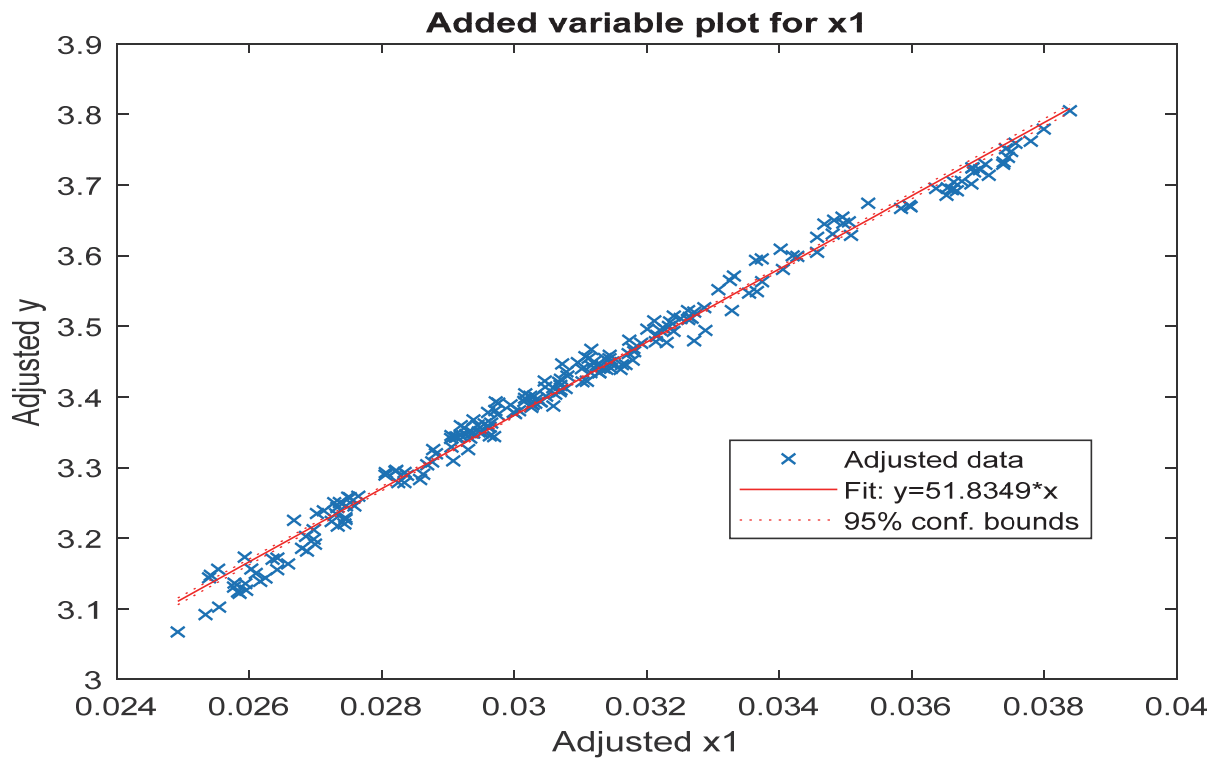


Рисунок 21 – Частная регрессия биологической продуктивности пастбища от вегетационного индекса (NDVI)

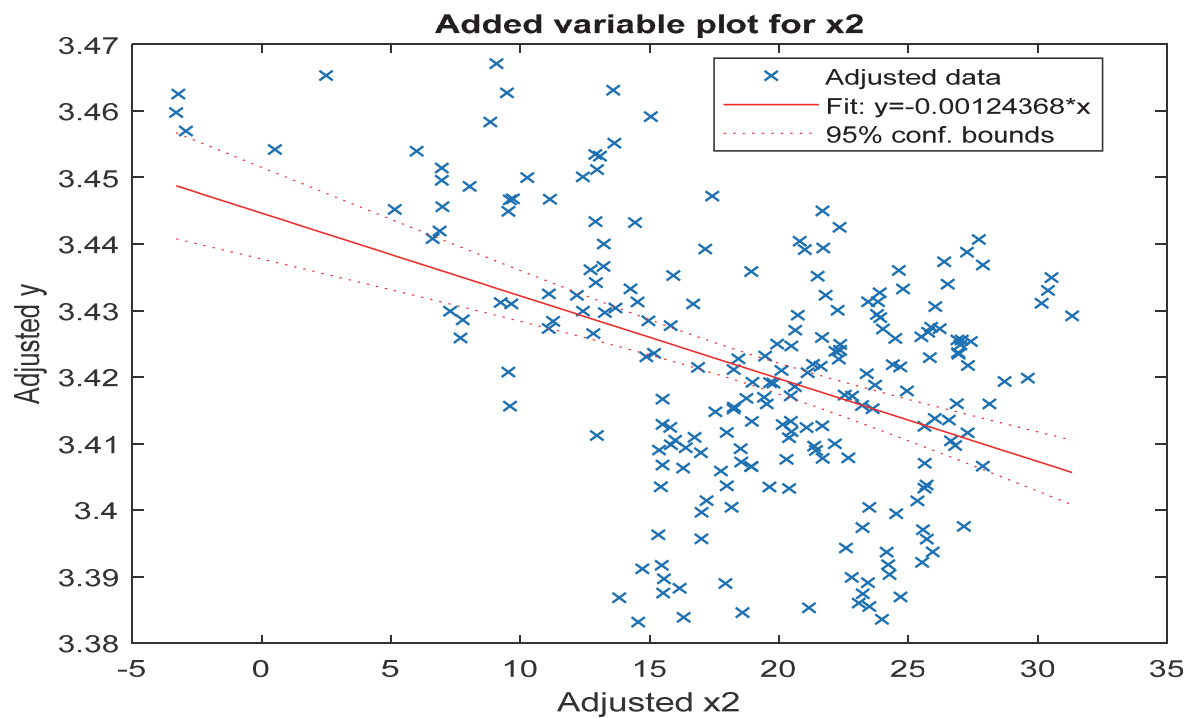


Рисунок 22 – Частная регрессия биологической продуктивности пастбища от температуры, С°

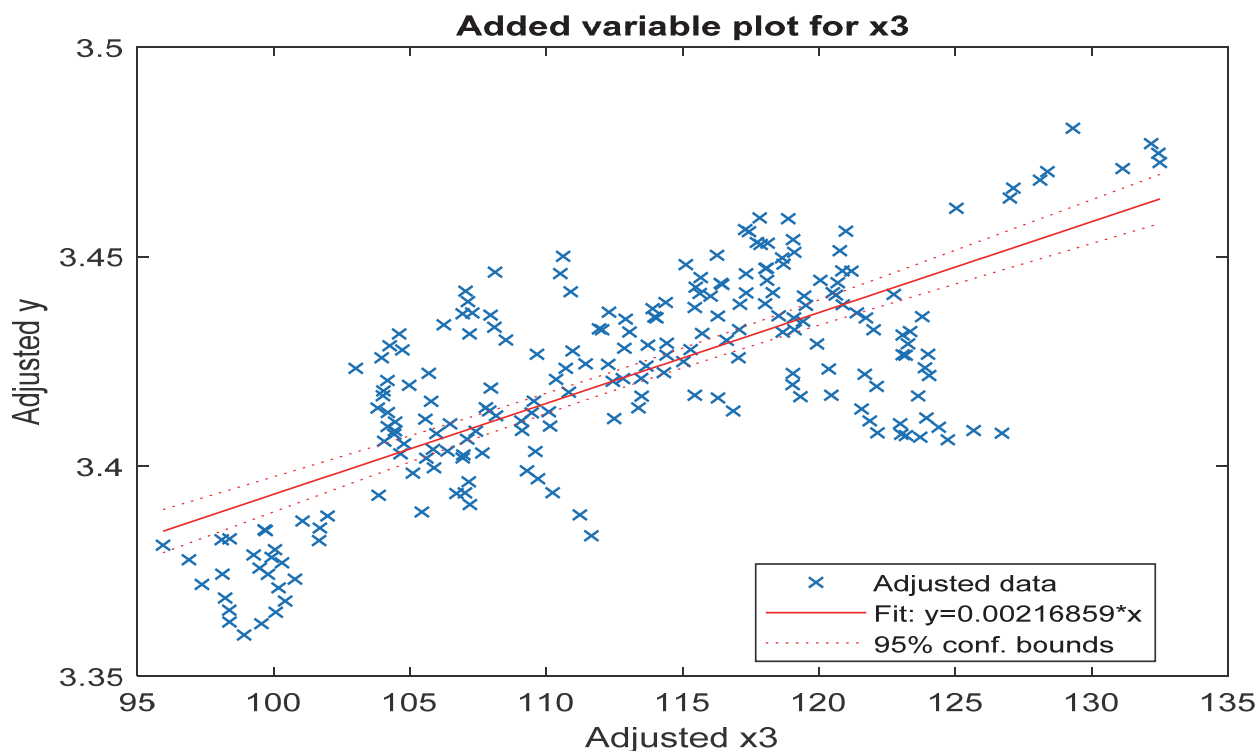


Рисунок 23 – Частная регрессия биологической продуктивности пастбища от количества осадков

Таким образом, из представленных графиков следует, что зависимость биологической продуктивности пастбища от индекса NDVI и от количества выпавших осадков прямая, причем от значения индекса NDVI весьма тесная. Зависимость от температуры – обратная и слабо выраженная.

Полученный вывод совпадает с выводом, сделанным в предыдущих разделах о том, что формирования модели прогнозирования пастбищного плодородия необходимо проводить учет результатов выпадения и накопления осадков за предыдущий производственный период, который может начинаться с октября предыдущего года, как это принято в овцеводстве, где основные учетные процессы начинаются с осеннего периода.

Вегетационный индекс, определяемый дистанционно с применением специальной технологической аппаратуры аэрокосмических ресурсов, позволяет, таким образом, определить одновременно потенциал пастбищных кормовых ресурсов на пастбищных участках для эффективного производства и потребления пастбищных кормов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экономическая эффективность применения дистанционного аэрокосмического мониторинга для улучшения биологической продуктивности пастбищных территорий будет определяться эффективностью проведения комплекса мероприятий:

- аэрокосмический мониторинг энергетической и питательной ценности пастбищных кормов;
- построение прогностических математических моделей эффективного ведения пастбищного животноводства;
- поиск дополнительных источников водных ресурсов;
- определение периодов оптимального использования природных и культурных пастбищ.

Таким образом, предварительные расчеты показывают, что внедрение системы дистанционного аэрокосмического мониторинга позволит достичь рационального использования пастбищных угодий, что позволит избежать деградации пастбищных угодий и дополнительно получать по 1-1,2 ц кормовых единиц с 1 га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абатуров Б.Д. Пастбищный тип функционирования степных и пустынных экосистем [текст] // Успехи соврем. биологии. 2006. Т. 126, № 5. С. 435-447.

2. Барталев С. А. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS (Bartalev S. A. Klassifikatsiya nekotorykh tipov sel'skokhozyaystvennykh posevov v yuzhnykh regionakh Rossii po sputnikovym dannym MODIS)// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.

3. Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Цифровая обработка аэрокосмических изображений. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. [Электронный ресурс]. URL: http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/54/u_course.pdf (дата обращения 12.11.2018).

4. Михайленко И. М., Тимошин В.Н., Малыгин В.Д. Принятие решений о дате заготовки кормов на основе данных дистанционного зондирования Земли и подстраиваемых математических моделей//Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2017. Т.14. №2. С. 65-79.

5. Черепанов, А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – №3. – С. 28-32.

6. Дистанционное зондирование пастбищ для прогнозирования продуктивности овец / В. И. Трухачев, С. А. Олейник, Т. С. Лесняк [и др.] // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 3. – С. 129-137. – DOI 10.26897/0021-342X-2022-3-129-137.

7. Патент № 2719781 С1 Российская Федерация, МПК А01К 5/02, А01К 29/00. Дистанционная система передачи данных для безопасного скармливания грубых кормов пастбищным животным : № 2019121078 : заявл. 03.07.2019 : опубл. 23.04.2020 / В. И. Трухачев, С. А. Олейник, В. Ю. Морозов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования "Ставропольский государственный аграрный университет".

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664074 Российская Федерация. Оценка и уточнение контуров полей и посевных площадей на культурном пастбище : № 2019663234 : заявл. 24.10.2019 : опубл. 30.10.2019 / В. И. Трухачев, С. А. Олейник, В. Ю. Морозов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет».

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666892 Российская Федерация. Дистанционная оценка плодородия пастбищ с помощью беспилотных аппаратов : № 2019663465 : заявл. 29.10.2019 : опубл. 17.12.2019 / В. И. Трухачев, С. А. Олейник, В. Ю. Морозов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ставропольский государственный аграрный университет".

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612775 Российская Федерация. Программный комплекс по оценке кормовой ценности пастбищных угодий : № 2018610173 : заявл. 10.01.2018 : опубл. 27.02.2018 / С. А. Олейник, С. П. Скляр, Д. В. Иванов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет».

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018662372 Российская Федерация. Программа для расчета площадей пастбищных угодий : № 2018617147 : заявл. 09.07.2018 : опубл. 05.10.2018 / В. И. Трухачев, С. А. Олейник, В. Ю. Морозов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ставропольский государственный аграрный университет»

**Разработка множественной
регрессионной математической
модели продуктивности пастбища
на протяжении производственного
сезона или периода**

Методические рекомендации