A satellite with four solar panel arrays is shown in orbit above the Earth. A beam of light from the satellite illuminates a patch of land on the ground below.

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ  
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА  
И ЗОНДИРОВАНИЯ  
В ПАСТБИЩНОМ ЖИВОТНОВОДСТВЕ**



МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ  
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА  
И ЗОНДИРОВАНИЯ В ПАСТБИЩНОМ  
ЖИВОТНОВОДСТВЕ**

*Методические рекомендации*

Ставрополь  
«АГРУС»  
2020

УДК 636  
ББК 45/46  
П76

**Применение современных цифровых технологий дистанционного мониторинга и зондирования в пастбищном животноводстве : методические рекомендации / В. И. Трухачев, С. А. Олейник, Т. С. Лесняк, Д. Б. Литвин. – Ставрополь : АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2020. – 76 с.**

ISBN 978-5-9596-1711-0

Для специалистов в области пастбищного животноводства, а также научно-технических работников – исполнителей научно-исследовательских работ по теме «Разработка инновационных методических подходов по применению современных цифровых технологий дистанционного мониторинга и зондирования в пастбищном животноводстве».

**УДК 636  
ББК 45/46**

ISBN 978-5-9596-1711-0

© ФГБОУ ВО Ставропольский государственный аграрный университет, 2020

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| Введение  | 4  |
| 1. Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы; затрагивающей научно-техническую проблему исследования по проекту, изучение существующих методических подходов проведения работ по применению различных цифровых методов дистанционного мониторинга состояния пастбищ..... | 5  |
| 2. Результаты оценки динамики вегетационного индекса (NDVI) на пастбищных участках, полученные с помощью различных методов дистанционного мониторинга и зондирования местности.....   | 27 |
| 3. Результаты оценки производственных показателей технологических групп пастбищных животных, полученные по результатам зоотехнического учета, применяемого в племенном хозяйстве.....   | 36 |
| 4. Методические подходы по обоснованию периодов оптимального использования пастбищных участков, основанные на применении различных дистанционных методов мониторинга вегетационного индекса растительности, оценки питательной ценности пастбищных кормов.....  | 38 |
| Список использованной литературы.....   | 62 |
| Приложение.....   | 67 |

## **Введение**

Для решения глобальных вопросов, связанных с ростом численности мирового населения, человечеству необходимо изменить методы ведения сельскохозяйственной деятельности. Через 30 лет для того, чтобы обеспечить продуктами питания все мировое население понадобится на 70% больше продовольствия. Снижение количества и качества плодородных земель, изменения климата, высокие затраты на энергоносители - все это будет серьезно препятствовать производству достаточного количества продуктов питания. Повысить урожайность и сократить издержки в сложившихся условиях позволяет концепция «умного» сельского хозяйства.

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. Разработка инновационной системы пастбищного животноводства на основе применения цифровых аэрокосмических технологий является новым современным направлением развития отрасли пастбищного животноводства), призванным решить многочисленные проблемы восстановления плодородия почвы и пастбищ для животных.

# **1. Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы; затрагивающей научно-техническую проблему исследования по проекту, изучение существующих методических подходов проведения работ по применению различных цифровых методов дистанционного мониторинга состояния пастбищ.**

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.

Перед отечественной аграрной наукой поставлена задача по сохранению и совершенствованию продуктивных и племенных качеств завезенного скота. При этом помимо технологий кормления и содержания животных, науке следует провести оценку племенной ценности для дальнейшего совершенствования, что требует применения передовых методик оценки по генотипу с использованием методов селекции с достижениями популяционной генетики и информационных технологий.

Являясь источником биологически ценных кормов из дикорастущих трав, природные кормовые угодья (пастбища и сенокосы) играют важнейшую роль в отечественном животноводстве [13].

Повышенная антропогенная нагрузка и меняющиеся климатические условия часто приводят к трансформации природных травостоев, в том числе к изменению их продуктивности и видового состава [7]. Организация устойчивого животноводства сопряжена с необходимостью постоянного контроля состояния естественных кормовых угодий. Для оценки состояния

природных травостоев обычно проводят наземные геоботанические обследования, которые в силу своей трудоёмкости и больших размеров, требующих обследования территорий, не способны обеспечить регулярное получение информации с достаточно высоким уровнем точности [18].

В сложившихся условиях современности инновационные космические технологии все более широко внедряются в ведение сельскохозяйственного производства. Среди основных трендов – технологии точного земледелия, инновационные интернет серверы сельскохозяйственных предприятий, системы мониторинга подвижного состава и учета расходных материалов.

Система наблюдения за различными надземными объектами, в том числе и пастбищами и стадами, при помощи самолетных, аэростатных средств, спутников и спутниковых систем называется аэрокосмическим методом мониторинга.

Интеллектуальные технологии наиболее активно внедряются в мелко-масштабное полевое хозяйство, пастбищное животноводство и рыбный промысел. Наибольший прогресс в распространении «умных» решений наблюдается в сфере растениеводства при выращивании зерна.

Развитию возможностей использования методов дистанционного зондирования для мониторинга состояния природных кормовых угодий (прежде всего, пастбищ) посвящено значительное число научных исследований, проводимых с конца прошлого столетия [1].

К настоящему времени распространение получили подходы к дистанционной оценке состояния пастбищ на основе использования нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI [37].

При этом часто предполагается, что значение NDVI определяется вкладом растительного покрова и почвы, выраженным линейной комбинацией значений спектральных коэффициентов яркости указанных двух компонентов, взятых с весами, пропорциональными относительной доле занимаемой ими площади в пикселе спутникового изображения [32].

Анализируется пространственно-временная изменчивость распределения значений NDVI по территории пастбищ и их многолетняя динамика. Для выявления деградированных участков травостоя может использоваться метод разделения спектральных смесей, позволяющий оценивать проективное покрытие травяного покрова на основе определения вклада таких компонент, как растительность, оголённая почва и камни [24,30, 33,].

При этом существующие в настоящее время методы оценки степени деградации естественных кормовых угодий с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), как правило, не связывают со шкалами, используемыми при проведении наземных геоботанических обследований. Целью наших исследований было установление связи между дистанционно измеряемыми спектрально отражательными характеристиками естественных кормовых угодий и показателями их состояния, получаемыми при наземных геоботанических обследованиях.

Спутниковые системы дистанционного мониторинга сегодня являются одним из наиболее эффективных и действенных методов получения информации о состоянии различных природных и антропогенных объектов. Следует отметить, что в последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс в развитии методов и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Именно в этот период появились и стали активно использоваться комплексы наблюдения Земли нового поколения появление которых открыло новую эру спутникового дистанционного зондирования и позволило, в том числе и в России, создать принципиально новые, высоко автоматизированные технологии работы с данными ДЗЗ [1]. Это позволило начать активно создавать и внедрять как специализированные системы дистанционного мониторинга, ориентированные на решение задач контроля конкретных явлений и процессов, так и региональные системы мониторинга, обеспечивающие наблюдение и контроль различных процессов и явлений в пределах одной территории. При этом во многих случаях для региональных систем стало выгодно не строить свои специальные технологии для решения задач мониторинга конкретных групп объектов и явлений, а



использовать уже созданные и развивающиеся в рамках специализированных систем мониторинга подходы, информационные продукты и услуги.

Лупян Е.А. и Барталев С.А. в своих исследованиях по изучению применения спутникового сервиса «Вега» выявили, что при проведении регионального мониторинга решаются такие задачи как: задачи мониторинга состояния лесных ресурсов; задачи мониторинга сельскохозяйственных земель; контроль влияния на растительный покров хозяйственной деятельности; оценка состояния и изменений животного мира региона (контроль кормовой базы); контроль последствий неблагоприятных природных явлений, в том числе наводнений; контроль и анализ динамики растительного покрова региона, связанной с крупномасштабными климатическими изменениями; контроль крупномасштабных комплексных изменений растительного покрова, вызванных хозяйственной деятельностью в регионе.

В своих исследованиях J. D. Rotz, A. O. Abaye и др., установили, потенциал полуавтоматической классификации наземных цифровых фотографий для оценки продуктивного почвенного покрова, полученный результат составил 83,7 % схожести с картами почвенного покрова [36].

D. Terrance Booth и Samuel E. Cox предлагают использовать программное обеспечение «SAMPLEPOINT» с функцией точечной классификации цифровых изображений, что позволяет сэкономить время и затраты относительно обычных полевых измерений [13].

Измерение, преобразование и анализ физических параметров световых полей объектов составляет основу дистанционных оптических методов изучения природных образований. Измеряемыми параметрами в этих исследованиях являются: пространственные, временные и угловые зависимости энергетических, спектральных и поляризационных характеристик поля излучения Земли и объектов на ее поверхности и в атмосфере.

Исследования отечественных и зарубежных авторов показывают, что в красной области спектра (0,6 – 0,7 мкм) находится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в

инфракрасной области (0,7 – 1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа [2, 24]. NDVI – простой количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). В диапазоне длин волн 600 – 700 нм (видимый красный) хлорофилл имеет выраженный максимум поглощения. В области же NIR (Near InfraRed – ближнего инфракрасного (ИК) диапазона) растительность, как правило, имеет высокий коэффициент отражения (рисунок 1).

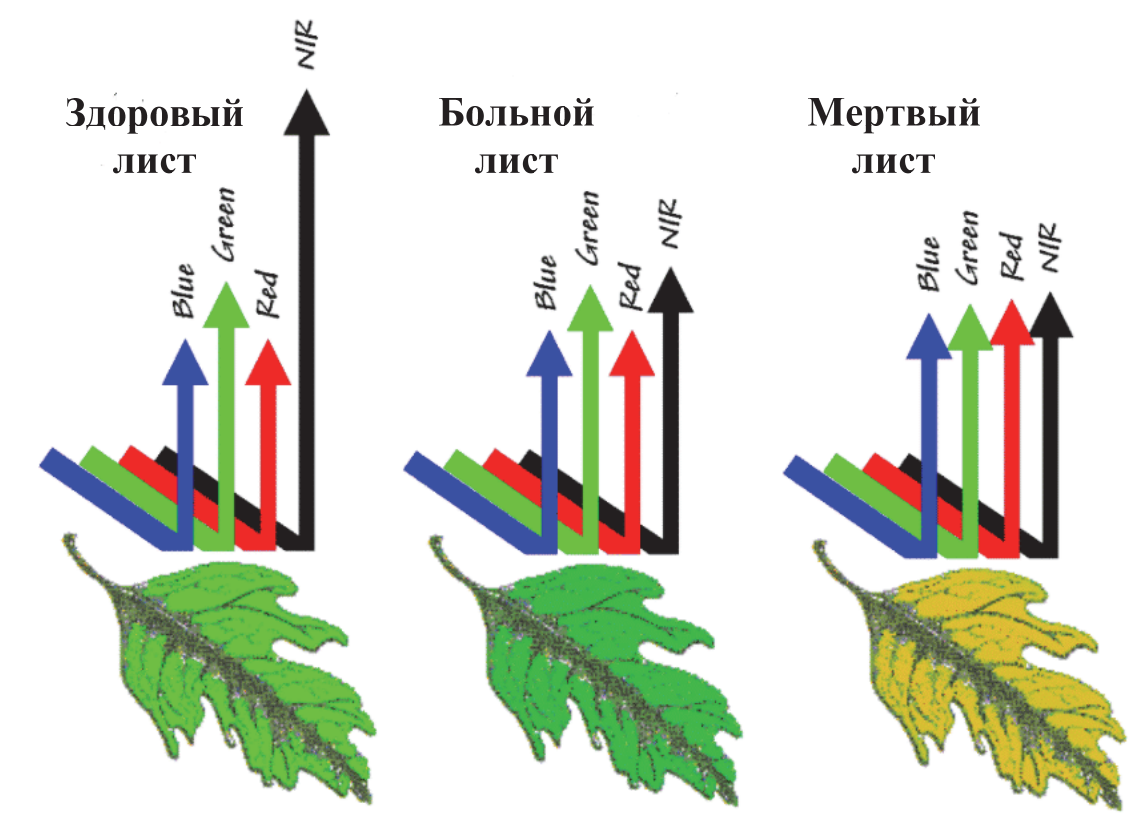


Рисунок 1 – Отражающая способность растительности различного типа

NDVI вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - Red(Blue)}{NIR + Red(Blue)} \quad (1)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра,  
Red (Blue) – отражение в красной(синей) области спектра.

После запуска первого космического спутника по программе Landsat в 1972 году, ученые начали использовать, для оценки продуктивности растительности, данные ближнего инфракрасного и красного света. Таким

образом, NDVI может быть рассчитан на основе любых снимков высокого, среднего или низкого разрешения, имеющим спектральные каналы в красном (0,55 – 0,75 мкм) и инфракрасном диапазоне (0,75 – 1,0 мкм).

В исследованиях Bernardi, A. И др., выявлена взаимосвязь вегетационного индекса и физико-химического состояния почвы, а так же использование спутниковых систем для оценки плодородия пастбищ [15].

Пример расчета NDVI для здоровых и стрессовых культур (растительности) представлен на рисунке 2.

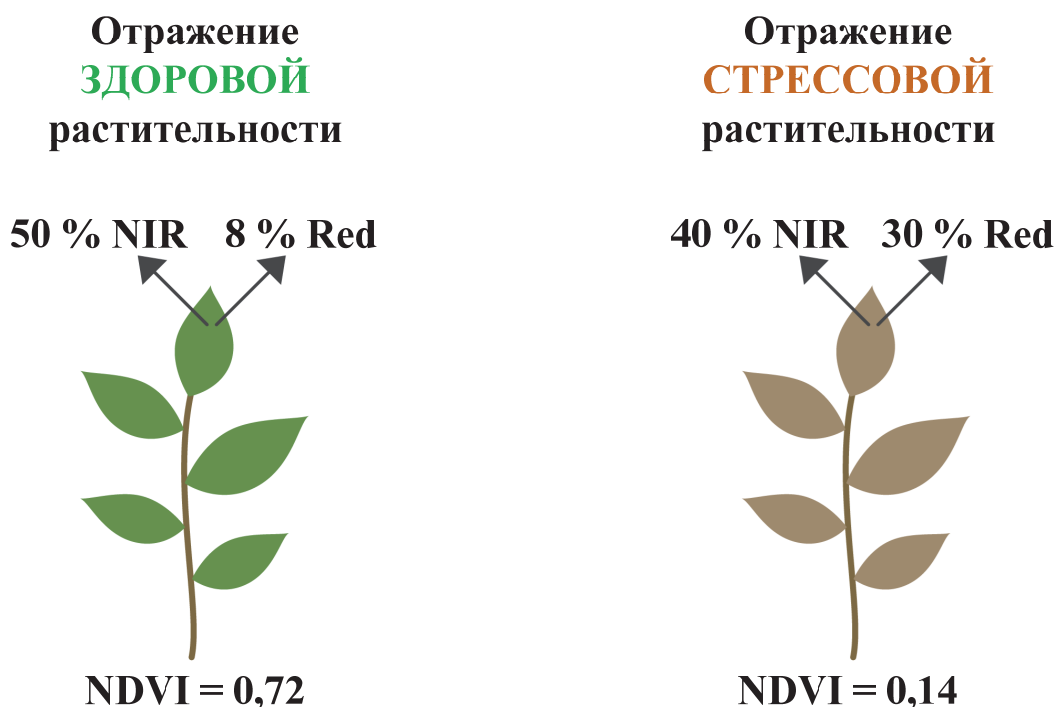


Рисунок 2 – Пример расчета NDVI для здоровых и стрессовых культур (растительности)

NDVI позволяет сравнивать данные друг с другом из различных географических областей, произведенных в разное время дня или года, так как NDVI – нормированная разница между красным и ближним инфракрасным светом.

Большой пространственный охват спутниковых систем позволяет проводить мониторинг территорий, соразмерный с площадями областей и целых стран. Для проведения дистанционной оценки плодородия пастбищ были использованы каналы «B4», «B5» снимков спутника Sentinel-2 L1C [2,

34]. При проведении аэрофотосъемки местности с дальнейшим построением детальной цифровой карты местности, расположение пастбищ была использована модифицированная камера Canon EOS 650D с красным фильтром Wratten 25A, которая позволяет регистрировать на одном снимке два независимых канала изображения – видимый красный (600 – 700 нм) или синий и ближнем ИК диапазонах (700-950 нм). NDVI рассчитывается как отношение разности яркостей пикселей в ИК и красном (синем) каналах к их сумме [8, 10, 28].

Красный NDVI более чувствителен к стрессу культур и имеет гораздо более высокий контраст (большой динамический диапазон) по сравнению с синим NDVI (рисунок 3).

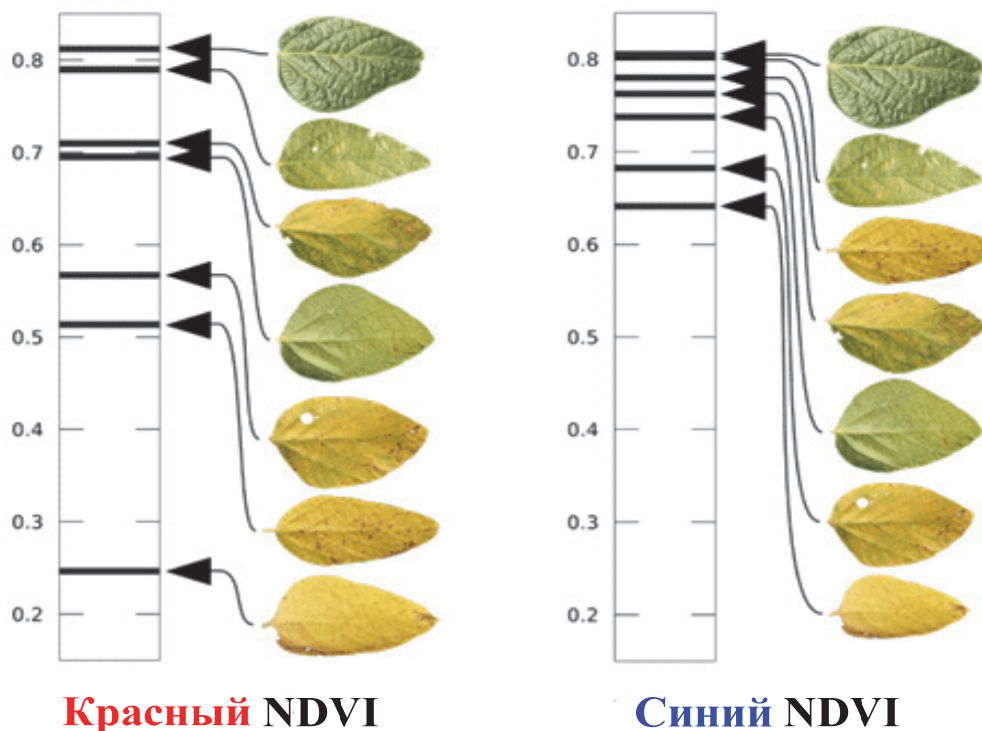


Рисунок 3 – Динамические диапазоны красного и синего NDVI

Дополнительный недостаток синего фильтра – рассеяние синего света в атмосфере, это препятствует обнаружению стресса урожая с помощью камеры, установленной на БПЛА, поэтому модифицированную камеру Canon EOS 650D использовали с красным фильтром Wratten 25A (рисунок 4).

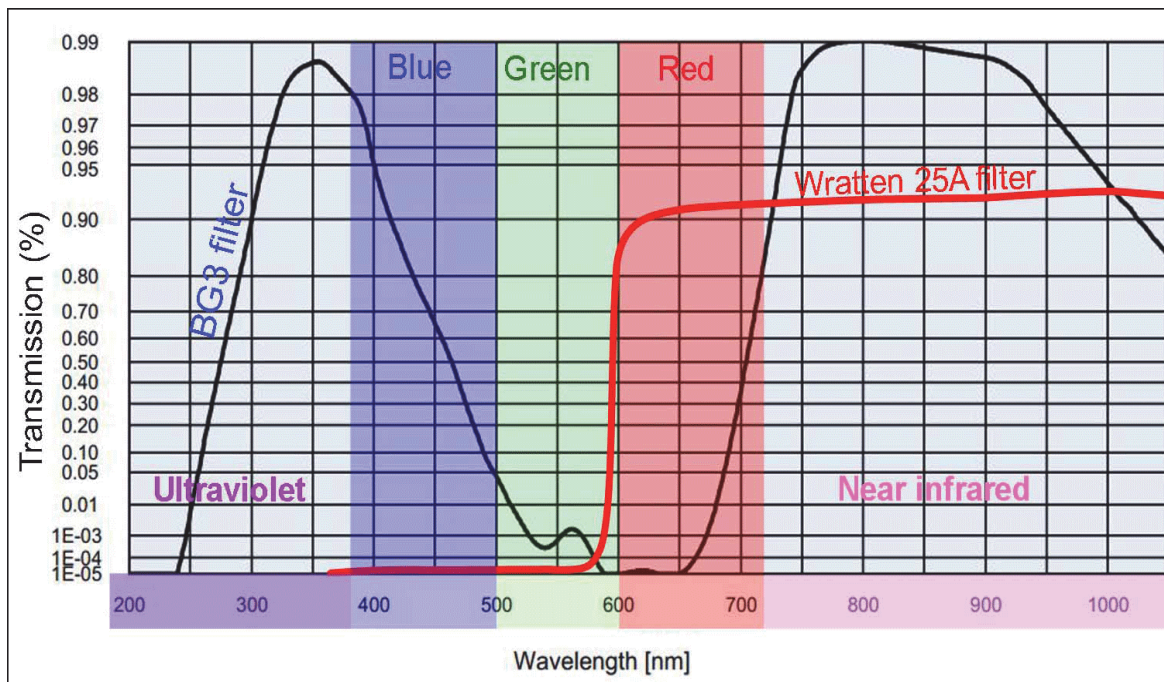


Рисунок 4 – Возможности фильтров в различных диапазонах частот

Опытным путем проведен подбор цветового образца для установки баланса белого модифицированной камеры. При правильно установленном балансе белого снимки здоровой растительности, полученные модифицированной камерой с красным фильтром будут иметь синий цвет.

Доступ к широкому спектру данных мониторинга окружающей среды (атмосферы, земной поверхности, включающей сушу, океаны, водостоки) из космоса дистанционными средствами в оптическом и радиодиапазоне длин волн организовать несложно, если использовать Интернет и соответствующие информационные ресурсы. Нет формальных препятствий для организации прямой связи со спутниковыми приборами-зондировщиками. Для этого достаточно иметь средства на приобретение отечественных или зарубежных наземных станций приема спутниковой информации, программного обеспечения и иметь коллективы квалифицированных специалистов в области информационных технологий, геоинформационных систем и соответствующих предметных областей.

Такие центры на региональном, ведомственном и Федеральном уровне созданы, действуют [1–3]. Поставляется ими информация в ограниченной области приложений (наиболее известные из них – мониторинг лесных

пожаров, контроль паводковой ситуации, создание карт и оценка биоресурсов и т. д.), но не всегда она используется в масштабах России или даже в отдельных ее областях. Одна из причин этого в том, что в ряде случаев к этой информации не высок уровень доверия.

Один из основных путей повышения достоверности зондирования в оптическом диапазоне длин волн состояния или характеристик земной поверхности (суши, водных акваторий) состоит в атмосферной коррекции ее аэрокосмических изображений. Это достигается, если известно оптическое состояние атмосферы в момент съемки или близкий к нему момент. Информацию о составе и состоянии атмосферы можно получать от наземных, авиационных или спутниковых источников. Последние представляют особый интерес, так как они могут быть получены практически для любых географических координат. В работах J. Dozier, Y. Kaufman, T. Lee, P. Dowty, O. Arino, Giglio [4–8] изложены методические основы детектирования, в частности, тепловых аномалий из космоса на основе систем глобального и регионального мониторинга NOAA/AVHRR и EOS/MODIS. Разработаны соответствующие алгоритмы для ESA (European Space Agency), IGBP (International Geosphere and Biosphere Project), CCRS (Canada Centre for Remote Sensing), системы EOS. Обзорные работы [7] и [8] дают полное представление о ключевых аспектах проблемы космического мониторинга земной поверхности и оперативных спутниковых методах решения этой проблемы.

За рубежом технология атмосферной коррекции спутниковых изображений земной поверхности развивается интенсивно в США, Франции, Германии. Создание этих программно-информационных средств идет по двум направлениям с точки зрения их доступности и уровня. Созданы и эксплуатируются комплексы или пакеты программ открытого доступа и коммерческие продукты.

Примеры программ приведены ниже. Некоммерческие программные продукты (продукты открытого доступа) Программа MOD09 разработана в Direct Readout Laboratory (DRL) GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center,

NASA). Ее характеристика: учитываются только молекулярно-аэрозольного поглощения и рассеяния, но при этом процесс бокового подсвета игнорируется; может обрабатывать только данные MODIS; для учета атмосферы используют прогностические данные ( т. е. модельные) об оптическом состоянии атмосферы; отсутствует учет рельефа земной поверхности. Программа SMAC, созданная для атмосферной коррекции данных SPOT. Метод SMAC (Simplified Method for the Atmospheric Correction) производит только радиометрическую и геометрическую коррекцию, но без учета атмосферных искажающих факторов. Коммерческие продукты ATCOR (Atmospheric Correction for Flat and Rugged Terrain).

Пакет ATCOR разработан специалистами DLR (German Aerospace Center) и распространяется под коммерческой лицензией ReSe Applications Schldpfer. Целью атмосферной/топографической коррекции является устранение влияния атмосферы и эффектов освещения для восстановления физических параметров земной поверхности, например, отражательной способности (reflectance) подстилающей поверхности, излучательной способности (emissivity) и температуры.

ATREM (the ATmospheric REMoval). ATREM – программный пакет, разработанный в университете Колорадо, США, для восстановления отражательной способности поверхности на основе гиперспектральных данных с использованием модели переноса излучения. Несмотря на то, что пакет программ ATREM больше не поддерживается и не доступен новым пользователям, он до сих пор широко применяется для обработки гиперспектральных данных. В пакете заложены основные возможности атмосферной коррекции.

FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes). FLAASH – это основанный на MODTRAN4 пакет атмосферной коррекции, разработанный в Air Force Phillips Laboratory, Hanscom AFB и Spectral Sciences, Inc (SSI) (Adler-Golden et al., 1999). Эта программа обеспечивает точное, физически обоснованное определение отражательной способности поверхности

путем определения параметров атмосферы: альbedo поверхности, высоты поверхности, общего содержания водяного пара, оптической толщи аэрозоля и облачности, температуры поверхности и атмосферы на основе гиперспектральных данных. FLAASH используется в спектральном диапазоне 0.4–2.5 мкм.

12 апреля 2018 г. в соответствии с приказом Минсельхоза России № 130 от 02.04.2018 г. введена в эксплуатацию «Единая федеральная информационная система о землях сельскохозяйственного назначения и землях, используемых или предоставленных для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий» (ЕФИС ЗСН). Система предназначена для обеспечения Минсельхоза и подведомственных ему учреждений и организаций актуальной и достоверной информацией о таких землях – их местоположении, состоянии и фактическом использовании, а также о состоянии сельскохозяйственной растительности. В настоящее время доступ к ЕФИС ЗСН обеспечен авторизованным пользователям из региональных органов управления агропромышленным комплексом, а также из подведомственных Минсельхозу России центров и станций агрохимической службы, управлений по мелиорации земель и сельскохозяйственному водоснабжению.

Спутниковая съемка позволяет не только сформировать наглядную карту земельных угодий, определить их фактическое использование, но и выявить неиспользуемые участки или земли нецелевого использования. С помощью космических снимков могут быть обнаружены очаги эрозии, переувлажнения, заболачивания и иных проявлений деградации земель. Осуществление таких анализов поможет на государственном уровне планировать сельскохозяйственные работы.

Систематические космические и аэрокосмические съемки помогают сделать качественную оценку всхожести и созревания урожая, выявить заболевания на ранней стадии. По результатам обработки данных дистанционного зондирования могут быть составлены карты неоднородности состояния посевов, а также рекомендации для дифференцированного внесения



минеральных и органических удобрений. Благодаря этому заказчик сможет удаленно контролировать все процессы, а также прогнозировать урожайность отрасли растениеводства и состояния пастбищ [4].

Кроме этого, ряд сельскохозяйственных культур и их категорий, сезонные отличия динамики развития между которыми достаточно велики, выявляются автоматически, без использования обучающей информации, на всю территорию страны.

Спутниковые технологии с успехом могут применяться не только в растениеводстве, но и в животноводстве.

Основными рисками в сельскохозяйственной сфере являются природные катаклизмы - засухи, наводнения, нашествие вредителей. Для оперативного устранения неблагоприятных последствий проявления стихии могут быть с успехом использованы современные аэрокосмические технологии, позволяющие своевременно предотвращать негативное проявление климатических факторов [1].

Отследить указанные процессы помогают специальные сенсорные датчики и устройства, устанавливаемые на спутнике, которые делают снимки в определенном спектральном диапазоне, благодаря чему фиксируются движение воздушных масс, тепловые аномалии, прирост биомассы и т.д. По результатам анализа геоинформационная система предупреждает о вероятности тех или иных катаклизмов и дает возможность предупредить неблагоприятные их последствия [28].

Боровиков В.А. в своих исследованиях по изучению эрозионных процессов одновременно использовал данные дистанционного зондирования и топографические карты, в результате работы было отмечено, что преимуществом космических снимков по сравнению с топографическими картами является их гибкость и более высокая информативность; охватывая значительные территории они, в то же время, дают возможность выявлять малые эрозионные формы. Так же В.А. Боровиков отмечает, что повышается эффективность работы, так как исследователь освобождается от необходимости

сложной и затратной многоступенчатой генерализации карт сельхозугодий, и имеет дело с большими отрезками ландшафтов, в пределах которых производится детальный анализ исследуемых процессов [7].

Учеными Казахстана создана региональная база данных взаимосвязи динамики урожайности доминирующих ассоциаций пустынь Сарыесик-Атырау и Мойынкум со спектральными коэффициентами яркости. Предложен метод дифференциации урожайности древесного, кустарникового и травянистого ярусов пустынных пастбищных угодий на основании данных аэрофотометрирования и крупномасштабной аэрофотосъемки [23].

Ряд ученых акцентируют внимание на достоинствах дешифрирования аэро- и космических снимков, а именно: повторности, обзорности и возможностью получения сведений об отдельных объектах. Космические снимки, как никакие другие виды съемки, дают интегральные геоизображения всех компонентов геосистем, позволяющие увидеть их взаимодействие и связь [2].

Методы цифровой обработки снимков описаны в работах целого ряда авторов [1,6,15]. Одним из основных источников данных для геоинформационной системы являются материалы дистанционного зондирования, которые объединяют все типы данных, получаемых с носителей космического и авиационного назначения, и составляют значительную часть дистанционных данных как антонима контактных и обеспечивают объединение картографического и аэрокосмического методов.

В настоящее время формируются региональные информационные площадки, реализация которых осуществляется на основе развития единой технологии: от создания новой техники на базе малых платформ с оптико-электронными съемочными системами высокого разрешения до систем сбора и обработки информации [18].

На текущий момент система включает следующие данные: – границы сельскохозяйственных угодий (пашни, пастбища, сенокосы, многолетние насаждения, залежи). Возможность просмотра электронной векторной карты границ угодий по субъектам РФ обеспечена для всех неавторизованных

пользователей (<http://efis.mcx.ru/opendata>); – наименование и ИНН землепользователя; – сведения о выращиваемых сельскохозяйственных культурах за определённый год в пределах границ сельскохозяйственных угодий; – сведения о плодородии почв и негативных процессах в границах сельскохозяйственных угодий, выявленных в результате проведения полевых агрохимических обследований. Одной из частей ЕФИС ЗСН является модуль работы с данными дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), разработанный ООО «ИКИЗ» совместно с ИКИ РАН (<http://zsn.pro-vega.ru/>). В настоящее время модуль позволяет проводить анализ информации о сельскохозяйственных угодьях по данным ДЗЗ с учётом сведений об их местоположении (т.е. векторных границ) и произрастающих на них культурах.

Для каждого контура поля, занесённого в систему, на основе космических снимков различных спектральных диапазонов (оптического – Terra/MODIS, Landsat-8/OLI, Sentinel-2/MSI и др., радиоволнового – Sentinel-1/C-band SAR) и разного пространственного разрешения возможен расчет в автоматическом режиме средних значений различных показателей, по которым в той или иной степени можно судить о состоянии растительности (коэффициент спектральной яркости в разных каналах, вегетационный индекс NDVI и др.). В системе также предусмотрена возможность визуализации полученных значений за разные временные срезы (представления в виде графиков) и сравнения хода показателей за разные годы, в том числе со среднемноголетними значениями для различных групп сельскохозяйственных культур.

В пределах муниципальных образований обеспечивается еженедельный расчет рейтинга полей, занятых той или иной культурой, на основании усредненных по каждому полю значений NDVI. В зависимости от значений вегетационного индекса угодьям присваивается рейтинг от 1 (отсутствие растительности или растительность в плохом состоянии) до 5 (растительность в хорошем состоянии). На основе тех же значений возможно ранжирование на еженедельной основе муниципальных образований в пределах субъекта РФ по качеству условий произрастания той или иной культуры.

Информация о вегетационных индексах и рейтингах угодий предоставляется каждому авторизованному пользователю на безвозмездной основе. Она может использоваться по нескольким направлениям: для определения состояния посевов и оценки ожидаемого урожая; для выявления случаев предоставления землепользователем недостоверной информации о выращиваемых культурах (при существенных отклонениях графиков хода вегетационных индексов от типичных для той или иной культуры графиков в пределах муниципального образования, а также при значительных отклонениях рейтинга угодий, занятых той или иной культурой, от среднего рейтинга в пределах муниципального образования); для выдачи надзорным органам рекомендаций по проведению проверок на предмет выявления нарушений при использовании земельных участков (при существенном отставании угодий по развитию культур). В целом, очевидно, что космическая съёмка, обеспечивающая большой пространственный охват при высоком разрешении получаемых снимков и высокой повторяемости наблюдений, является одним из наиболее эффективных инструментов мониторинга земель сельскохозяйственного назначения, особенно на федеральном уровне. Широкому использованию материалов космических съёмок для указанных целей способствует увеличение группировки спутников ДЗЗ, в том числе тех, данные с которых распространяются на некоммерческой основе.

Анализ известных научно-методических подходов к созданию систем оперативного мониторинга состояния культурных пастбищ на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) показывает, что использование оптических средств ДЗЗ имеет уже достаточно большую историю и первые работы в этой области появились в начале 70-х годов прошлого столетия. С методологической точки зрения использование данных ДЗЗ в сельском хозяйстве осуществляется на основе различных вариантов вегетационных индексов (ВИ), среди которых наибольшее распространение получил индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), концепция которого была представлена (Kriegler et al., 1969), а сам он был впервые описан (Rouse et al.,

1973). Впоследствии этот индекс был трансформирован в различные варианты, такие как относительный вегетационный индекс (RVI), впервые описанный (Jordan, 1969); разностный вегетационный индекс (DVI), впервые упоминается (Lillesand and Kiefer, 1987), а также инфракрасный вегетационный индекс, впервые описан (Crippen, 1990). Примеры использования этих индексов можно найти в работах отечественных (Антонов, Сладких, 2009; Барталев, 2006; Черепанов, 2011; Шагиев, Рогова, Савельев, 2011) и иностранных авторов (Hill, Carey, 1997; Lawrence R., 1998; Agariou et. al., 2012).

По своей сути вегетационные индексы, представляют собой скалярные безразмерные величины, что не позволяет получить на их основе многокомпонентную информацию о физических параметрах, таких как массовые и качественные показатели травостоев, необходимую для принятия управленческих решений. Особенно актуальны эти решения в задачах управления лугопастбищным хозяйством, в частности при оперативном контроле параметров состояния фитомассы травостоев.

Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных участках кривой спектральной отражательной способности растений. Такой подход позволяет получать только обобщенные оценки состояния посевов. Важно заметить, что при расчёте любого вегетационного индекса (ВИ) снижается информационный потенциал метода ДДЗ, так как ВИ представляет собой разновидность линейной свертки сигналов в скалярную величину, что всегда приводит к уменьшению общей информативности отдельных каналов.

Вегетационный индекс это показатель, рассчитываемый в результате операций с разными спектральными диапазонами (каналами) ДДЗ, и имеющий отношение к параметрам растительности в данном пикселе снимка. Эффективность ВИ определяется особенностями отражения; эти индексы выведены, главным образом, эмпирически.

NDVI – это наиболее известный индекс, которому более всего доверяют практики, так как он прост для вычисления, имеет самый широкий

динамический диапазон из распространенных ВИ, и лучшую чувствительность к изменениям в растительном покрове. Этот индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного и атмосферного фона, кроме случаев с бедной растительностью. NDVI позволяет провести визуальный осмотр растительности на снимке с количественной точки зрения, и при этом выделить территорию с бедной растительностью.

PVI – этот индекс несколько менее, но также широко распространен, имеет узкий динамический диапазон и меньшую чувствительность и достаточно чувствителен к изменению атмосферы, относительно прост в использовании и нахождении почвенной линии, что особенно важно для использования других индексов. Иногда этот индекс лучше чем NDVI, особенно при оценке бедной растительности.

SAVI – этот индекс чаще используется при исследовании разреженной растительности. В этом случае, используется корректирующий фактор  $L$  больше чем 0.5, что в соответствии с указанием Huefe означает, что корректирующий фактор должен быть больше чем 0.5, если растительный покров недостаточно развит.

MSAVI этот индекс редко используется. Многие индексы, корректирующие влажные почвы, требуют предварительной атмосферой коррекции. При использовании вегетационных индексов для долговременного мониторинга, необходимо внимательно проанализировать вариабельность почв и выполнить атмосферную коррекцию [12].

Среди основных тенденций развития технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) можно отметить стремление ведущих мировых операторов космических аппаратов все более совершенствовать их техническое оснащение и, соответственно, возможности

Для повышения информативности задачи оценивания нужно не уменьшать, а напротив, увеличивать число независимых каналов измерения. Так число различных показателей, которые необходимо оценивать может достигать от 5-ти до 10-ти, а число видов болезней, вредителей и сорняков –

несколько десятков. Оценить эти состояния по одному или нескольким скалярным ВИ невозможно и некорректно по научной постановке. Кроме того, существенным недостатком использования ВИ является то, что здесь не учитывается случайный характер самих оптических показателей и производных от них величин индексов для одних и тех же состояний. Это связано, как с изначальной неопределенностью спектральной принадлежности оцениваемых состояний растений, так и с влиянием приземного слоя атмосферы, физического состояния и морфологии посевов. Указанное обстоятельство может привести к существенным ошибкам в задачах оценивания, а также к серьезным методическим погрешностям. Так при оценивании континуальных величин параметров состояния посевов, таких как биомасса, ее влажность, товарная часть биомассы, сейчас применяют такую же методику, как и для оценки фитосанитарного состояния посевов, где появление сорняков, болезней и вредителей в условиях изначальной неопределенности являются случайными событиями и счетными переменными.

В результате в настоящее время сложилась ситуация, когда при высоком уровне космической и авиационной зондирующей техники, отсутствуют эффективные автоматизированные системы обработки данных дистанционного зондирования и их комплексирование с наземными измерениями.

Проведенный анализ существующих, в том числе международных проектов и инициатив (GEOS, GMES и др.) в области космического мониторинга позволил сделать следующие выводы:

– основной целью создания мониторинговых систем является объединение космической и наземной инфраструктур различной принадлежности для осуществления мониторинга, в ряде случаев - ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, но задачи текущего оценивания и прогнозирования формулируются фрагментарно и, как правило, не являются основной целью создаваемых систем;

– фактически все проекты базируются на предоставлении пост-событийных космических снимков в условиях отсутствия многоуровневой, интегрированной системы прогнозного мониторинга;

– существуют трудности координации по обработке разнородной информации.

Кроме того, проведенный анализ показывает, что основные проблемы, связанные с комплексной автоматизацией процессов прогнозирования сложных объектов носят не технический, а методологический характер и вызваны отсутствием теоретической базы, которая должна быть положена в основу создания соответствующего модельно-алгоритмического обеспечения.

При этом еще более существенные проблемы возникают при необходимости решения задач оценивания и прогнозирования, поскольку это требует создания моделей, учитывающих влияние большого количества факторов на состояние природных и природно-технологических систем. Этапы сбора необходимых данных, предварительной и тематической обработки, моделирования и визуализации результатов рассматриваются, как правило, в отрыве друг от друга и реализуются с помощью различных программных комплексов. Это снижает достоверность задач анализа и затрудняет автоматизированное решение задач состояния прогнозирования и поддержки принятия решений, которые требуют привлечение всех доступных данных, включая данные ДЗЗ, а также дополнительной информации (метеоданных, архивных материалов, и др.), знаний экспертов, и постоянной адаптации типов и параметров моделей в ходе единого цикла расчетов.

Обоснование научно-методической и алгоритмической базы для решения задачи оценивания состояния посевов культурных пастбищ обусловлено современными требованиями точности, надежности, высокой производительности систем мониторинга, что необходимо при применении информации от систем ДЗЗ для принятия различного рода управляющих решений. Вместе с тем информация, получаемая в этих системах, только косвенно связана с продуктивными показателями посевов и физическим



показателями корнеобитаемой среды. Это приводит к появлению больших ошибок в определении состояния посевов и почвы.

Для уменьшения ошибок оценивания предлагается использовать *теорию фильтрации в стохастических системах*. Эта теория направлена на существенное повышение точности оценивания состояния посевов и почвенной среды с учетом их пространственной распределенности и неоднородности. В соответствии с этой методикой существенное увеличение точности достигается за счет разработки динамических моделей продукционных показателей посевов и физического состояния почвенной среды.

Такие модели являются основными источниками априорной информации о состоянии посевов и почвенной среды. Однако, использование только таких моделей (что делается многими исследователями) не позволяет добиться поставленной цели, так как такие модели сами по себе обладают ошибками аппроксимации исследуемых процессов. Кроме того, дополнительные инструментальные ошибки вносят используемые средства измерения, к которым относятся и системы ДЗЗ.

Для компенсации неизбежных погрешностей дистанционных зондирующих измерителей вводятся модели измерения, отражающие взаимосвязь оптических показателей с искомыми параметрами состояния. Одновременное использование априорной информации от динамических моделей и оперативной информации от средств ДЗЗ позволяет оптимизировать по показателям точности весь процесс оценивания. При этом эта оптимизация достигается по двум каналам – прямой компенсации ошибок измерения и уменьшения ошибок моделирования.

В этом заключается суть первой основной методики оценивания параметров состояния фитомассы любых агроценозов, в т.ч. и пастбищных травостоев.

Второй существенной проблемой в общей задаче оценивания является идентификация используемых математических моделей, а именно динамической модели параметров состояния посева пастбищного травостоя и

модели оптического зондирования. Суть этой проблемы заключается в том, что травостой и почвенная среда обладают нестационарными и меняющимися во времени свойствами, что в свою очередь, приводит к изменениям параметров используемых математических моделей. Неучет таких изменений может привести к появлению больших ошибок в оценивании параметров фитомассы травостоя при принятии а и неадекватных решений. Для решения этой проблемы предлагается использовать методику тестовых участков, когда на пастбище (желательно на одном из доступных краев) выделяют 10-12 смежных участков, площадью 25-30 м<sup>2</sup> каждый. На каждом из участков вносят различное сочетание доз минеральных удобрений NPK и увлажняют почву разными нормами поливов. Такие различия приводят к различиям в параметрах состояния травостоя на этих участках.

Затем, периодически через каждые трое суток отбирают пробы растений и почвы, по которым формируют БД параметров состояния посева и почвенной среды в соответствии с математическими моделями (1),(2). Число таких измерений должно быть не менее 10-ти. По сформированной таким образом БД осуществляется оценивание параметров (идентификация) моделей (1), (2). В этом заключается суть второй методики оценивания параметров состояния фитомассы любых агроценозов, в т.ч. и пастбищных травостоев.

Алгоритм оценивания (4) обеспечивает 3–5%-ную точность оценивания, что вполне достаточно для выработки технологических воздействий на посевах по информации дистанционных оптических измерителей.

Третья существенная проблема оценивания параметров состояния посевов любых полевых культур обусловлена пространственной распределенностью и неоднородностью состояния посевов и почвенной среды. Ведь алгоритм оценивания (6) отражает только состояние одной точки, а как же быть с остальной площадью поля или пастбища?

Особенность модели продукционного процесса (1) заключается в строгой векторно-матричной канонической форме Коши, предназначенной для решения задач оценивания и управления. При этом параметры этой модели могут быть

легко оценены по информации, получаемой в результате идентификационного эксперимента на тестовых участках. Однако, по форме этой модели не видно, каким же образом учитывается пространственная неоднородность параметров состояния фитомассы по полю. Источниками такой неоднородности является наличие почвенных разностей, неравномерность технологического воздействия машин и животных на выпасе, а также влияние рельефа в агроландшафте. Пространственная неоднородность посева легко может быть отражена в математических моделях при использовании систем дистанционного зондирования посевов, когда формируются двумерные электронные снимки в нужных спектрах, на которых отражается состояние посева сразу по всей площади поля.

В скором будущем снимки аэрокосмического мониторинга станут более доступнее. Будут улучшаться пространственное разрешение снимков, и их изобразительные качества, и частота получения данных. Однако, все большую популярность и востребованность приобретут не сами данные, а конкретная информация, позволяющая принять верное решение [4].

Специализированные веб-сервисы смогут проводить автоматический анализ данных космических съемок, и предоставлять информацию в понятном контексте для работников аграрного сектора. Ожидается развитие приложений, позволяющих внедрять данные зондирования Земли с другими важными источниками информации: сведения метеонаблюдений, сведения о транспортном парке и расходу топлива, данные об урожайности, валовом сборе, расходе удобрений, данных бухгалтерского учета. Применение современных инновационных подходов в введении сельского хозяйства обеспечит позитивное развитие различных отраслей животноводства, в том числе и пастбищных систем содержания скота, признанных наиболее энерго- и ресурсосберегающими во всем мире, например при выращивании больших массивов овец и крупного рогатого скота мясного направления продуктивности [14].

## **2. Результаты оценки динамики вегетационного индекса (NDVI) на пастбищных участках, полученные с помощью различных методов дистанционного мониторинга и зондирования местности.**

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.

На химический состав и кормовые качества растений в значительной степени влияют почвенно-климатические условия. Растения, произрастающие в зоне умеренного климата на плодородных почвах, обладают повышенной питательной ценностью.

Пастбищная и скашиваемая на подкормку трава эффективно переваривается, усваивается, имеет особые функциональные свойства. Пастбищные корма насыщены полноценными белками, аминокислотами, различными витаминами и минеральными веществами. Наибольшей питательной ценностью обладают ранне- и среднеспелые кормовые зеленые культуры. По мере роста растений на залуженных участках их питательные свойства ухудшаются, что отображается в понижении содержания витаминов и протеина, органолептических свойств. Ценность пастбищных кормов в значительной степени связана с их ботанической структурой. Целесообразно, чтобы в травостое либо зеленой подкормке были бобовые растения, которые обогащены протеином, витаминами, фосфором и кальцием. К наиболее распространенным пастбищным бобовым растениям принадлежат клевер, вика, бобы, люцерна, горох и др.

Для получения качественных кормов с максимальным выходом питательных веществ уборку сеяных бобовых многолетних и однолетних культур рекомендуется проводить в фазе начала цветения - многолетних в

начале образования бобов в нижних ярусах, а однолетних, например люцерну - в фазе полной бутонизации.

Кормовые культуры многолетних злаковых растений и природных кормовых угодий, зернофуражные культуры рекомендуется убирать в фазе начала колошения.

При организации кормления крупного рогатого и мелкого скота в летний период с использованием свежескошенных или пастбищных кормов возникает острая необходимость в постоянном контроле их питательной ценности. Одним из эффективных, на наш взгляд, методом контроля является построение и анализ математических моделей, описывающих питательность зеленых кормов [24].

Зеленые корма по химическому составу и питательной ценности должны соответствовать общепринятым нормативным требованиям и контролироваться по содержанию в них массовой доли сухого вещества, сырого протеина, сырой клетчатки, сырой золы и обменной энергии (кормовых единиц).

Содержание каротина в зеленой массе многолетних бобовых и злаковых трав должно быть не менее 30 мг, однолетних трав не менее 20 мг, подсолнечника, сорго, крестоцветных, листьев корнеплодов, травы естественных сенокосов и пастбищ не менее 15 мг на 1 кг сухого вещества.

В зеленых кормах содержание вредных и ядовитых растений не должно превышать 1%, сырой золы не более 12%.

Переводу скота на пастбищное содержание должно предшествовать обследование пастбищных угодий, распределение участков по гуртам, составление календарного плана использования.

Одной из главных причин, приводящих к перетравливанию пастбищ, является нарушение соотношения между поголовьем животных и запасом корма [1].

Ботанический состав пастбищных участков, на которых проводили исследования, представлен в таблице 1.

**Таблица 1 - Ботанический состав пастбищных трав**

| №<br>Пастбище | Период года              |   |                                     |                                     |
|---------------|--------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
|               | Весенний                 | Летний                                  | Осенний                             | Зимний                              |
| 1             | Злаково-бобовый<br>75-25 | Злаково-бобово-разнотравный<br>75-15-10 | Злаково-бобовый<br>75-25            | Злаково-бобовый<br>75-25            |
| 2             | Злаково-бобовый<br>73-27 | Злаково-бобовый<br>73-27                | Злаково-полынно-бобовый<br>50-30-20 | Злаково-полынно-бобовый<br>50-30-20 |

На исследуемых пастбищных участках преобладают злаковые корма: кострец безостый, мятлик луговой, овсяница и др.

Урожайность и химический состав злаковых зависят от многих факторов: зональности, типа местообитания, почвы, водного режима и др. На природных кормовых угодьях в лесной зоне злаки дают в среднем 1–1,2 т/га сена.

Биологическая продуктивность пастбищ и питательная ценность кормов в подопытных хозяйствах Ставропольского края представлены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 2 - Биологическая продуктивность пастбища кг/м<sup>2</sup>**

| №<br>Пастбище | Период года |        |         |        | Среднее за год |
|---------------|-------------|--------|---------|--------|----------------|
|               | Весенний    | Летний | Осенний | Зимний |                |
| 1             | 0,210       | 0,315  | 0,290   | 0,620  | 0,359          |
| 2             | 0,190       | 0,270  | 0,250   | 0,400  | 0,278          |

Ботанический состав и биологическую пастбищ определяли по общепринятым методикам в течение года по сезонам, продуктивность учитывали укосным методом. По приведенным данным, можно отметить, что наибольшая биологическая продуктивность отмечается в осенне-зимний период, однако показатели питательности, отмеченные в таблице 3 свидетельствует, что питательная ценность за данный период ниже.

**Таблица 3 - Питательная ценность, ЭКЕ/м<sup>2</sup>**

| №<br>Пастбище | Период года |        |         |        | Среднее за год |
|---------------|-------------|--------|---------|--------|----------------|
|               | Весенний    | Летний | Осенний | Зимний |                |
| 1             | 0,87        | 0,82   | 0,81    | 0,78   | 0,82           |
| 2             | 0,90        | 0,79   | 0,80    | 0,78   | 0,82           |

Питательная ценность кормов, выраженная в энергетических кормовых единицах (ЭКЕ) в весенний период года незначительно, но выше по отношению к летнему периоду на пастбище №1 на 6,0%, на пастбище №2 на 13,9%, к осеннему - 7,4% и 12,5%, к зимнему - 11,5% и 15,3 % соответственно.

Для разработки методических подходов по обоснованию периодов оптимального использования пастбищных участков, основанных на применении различных методов дистанционного мониторинга местности использовались информационные данные спутниковых сервисов и наземных полевых исследований.

Химический состав кормов определяли в лаборатории ЦКП НТЦ «Корма и обмен веществ» на оборудовании фирм INGOS (Чехия), FIBREITHERM (Германия), VELPSCIENTIFICA(Италия), при этом использовались методы проведения зоохиманализа кормов.

Влагу корма по разности между массой навески до и после ее высушивания при температуре 130°C в течение 40 мин и вычислении массовой доли влаги.

Сырой протеин корма определяли путем озоления органического вещества анализируемой пробы серной кислотой в присутствии катализатора, подщелачивании продукта реакции, отгонке и титровании выделяющегося аммиака, вычислении массовой доли азота и расчете массовой доли сырого протеина путем умножения полученного результата на коэффициент пересчета массовой доли азота на массовую долю сырого протеина, равный 6,25 (по Кьельдалю).

Сырую клетчатку корма определяли (по Геннебергу и Штоману) методом, основанному на последовательной обработке навески испытуемой пробы растворами кислоты и щелочи, озолении и количественном определении органического остатка весовым методом. Содержание сырой клетчатки выражают в виде массовой доли в % или в граммах на 1 кг сухого вещества.

Сырой жир в корме определяли методом экстракции сырого жира из навески диэтиловым или петролейным эфиром в аппарате Сокслета. удалении растворителя и взвешивании обезжиренного остатка.

Сырую золу в корме определяли методом определения массы остатка после сжигания и последующего прокаливания пробы.

Кальций в кормах определяли методом озоления органических веществ анализируемой пробы, обработке полученной золы раствором соляной кислоты, осаждении кальция в форме оксалата кальция с последующим растворением осадка раствором серной кислоты с образованием щавелевой кислоты, которую титруют перманганатом калия.

Фосфор в кормах определяли методом сухого озоления навески с углекислым кальцием и нагревании остатка с соляной и азотной кислотами (для органических кормов) или в мокром озолении навески смесью серной и азотной кислот (для минеральных соединений и жидких кормов). Аликвотную часть гидролизата смешивают с молибдованадатным реактивом и измеряют оптическую плотность полученного желтого раствора при длине волны 430 нм.

Свободные формы аминокислот в кормах (цистин и цистеин в сумме; метионин; лизин; треонин; аланин; аспарагиновая кислота; глутаминовая кислота; глицин; гистидин; изолейцин; лейцин; фенилаланин; пролин; серин; тирозин; валин.) определяли методом экстрагирования разбавленной соляной кислотой. Экстрагированные вместе с аминокислотами азотистые макромолекулы осаждали сульфосалициловой кислотой и отфильтровывали. Кислотность среды фильтра доводили до значения 2,20 ед. рН. Аминокислоты разделяли ионообменной хроматографией, проводили реакцию с нингидрином и определяли их концентрацию фотометрическим детектированием при длине волны 570 нм.

Определение общего содержания (свободных и связанных форм в сумме) отдельных аминокислот проводили методом в зависимости от определяемых отдельных аминокислот. Перед гидролизом цистин (цистеин) и метионин окисляли доцистеиновой кислоты и метионин сульфона соответственно. Тирозин определяли в гидролизатах не окисленных проб. Все другие аминокислоты, указанные выше, определялись как в окисленных, так и



неокисленных пробах. Окисление проводили при температуре 0°C смесью надмуравьиной кислоты с фенолом. Избыточный окислитель разлагался дисульфидом натрия. Окисленные или не окисленные пробы подвергали гидролизу с соляной кислотой молярной концентрации 6 моль/дм в течение 23 ч. Кислотность среды гидролизата доводили до 2,20 ед. рН.

Аминокислоты разделяли ионообменной хроматографией, дериватизировали нингидрином и детектировали при длине волны 570 нм (440 нм для пролина). Химический состав изучаемых пастбищных кормов представлен в таблице 4.

Таблица 4 - Химический состав пастбищных кормов

**Пастбище №1**

| Показатель                    | апрель | июль  | сентябрь | ноябрь | Среднее за год |
|-------------------------------|--------|-------|----------|--------|----------------|
| Сырой протеин, %              | 9,83   | 7,41  | 6,41     | 7,61   | 7,82           |
| Сырой жир, %                  | 2,25   | 2,48  | 1,57     | 1,57   | 1,97           |
| Сырая клетчатка, %            | 30,83  | 32,52 | 30,58    | 31,24  | 31,29          |
| Сырая зола, %                 | 7,26   | 8,02  | 8,99     | 12,01  | 9,07           |
| Кальций, %                    | 0,97   | 1,34  | 0,44     | 0,39   | 0,79           |
| Фосфор, %                     | 0,20   | 0,31  | 0,10     | 0,14   | 0,19           |
| Обменная энергия, МДж/кг      | 8,71   | 8,24  | 8,11     | 7,83   | 8,22           |
| Каротин, мг/кг                | 48,0   | 8,85  | 6,96     | 4,92   | 17,18          |
| NDVI                          | 0,39   | 0,23  | 0,16     | 0,29   | 0,27           |
| Биомасса, кг / м <sup>2</sup> | 0,210  | 0,315 | 0,290    | 0,620  | 0,359          |
| Питательная ценность, ЭКЕ     | 0,87   | 0,82  | 0,81     | 0,78   | 0,82           |

**Пастбище №2**

| Показатель                    | апрель | июль  | сентябрь | ноябрь | Среднее за год |
|-------------------------------|--------|-------|----------|--------|----------------|
| Сырой протеин, %              | 10,22  | 4,98  | 4,12     | 6,91   | 6,56           |
| Сырой жир, %                  | 2,02   | 1,86  | 1,01     | 1,09   | 1,50           |
| Сырая клетчатка, %            | 26,28  | 35,19 | 32,11    | 31,07  | 31,16          |
| Сырая зола, %                 | 8,68   | 5,88  | 6,23     | 11,07  | 7,97           |
| Кальций, %                    | 0,90   | 1,23  | 0,33     | 0,41   | 0,72           |
| Фосфор, %                     | 0,21   | 0,21  | 0,10     | 0,11   | 0,16           |
| Обменная энергия, МДж/кг      | 9,01   | 7,90  | 7,98     | 7,83   | 8,18           |
| Каротин, мг/кг                | 33,0   | 7,58  | 6,21     | 4,27   | 12,77          |
| NDVI                          | 0,36   | 0,18  | 0,12     | 0,25   | 0,23           |
| Биомасса, кг / м <sup>2</sup> | 0,190  | 0,270 | 0,250    | 0,400  | 0,278          |
| Питательная ценность, ЭКЕ     | 0,90   | 0,79  | 0,80     | 0,78   | 0,82           |

За основу взаимосвязи дистанционного мониторинга с химическими показателями пастбищного травостоя был применен вегетационный индекс NDVI (рис.5).

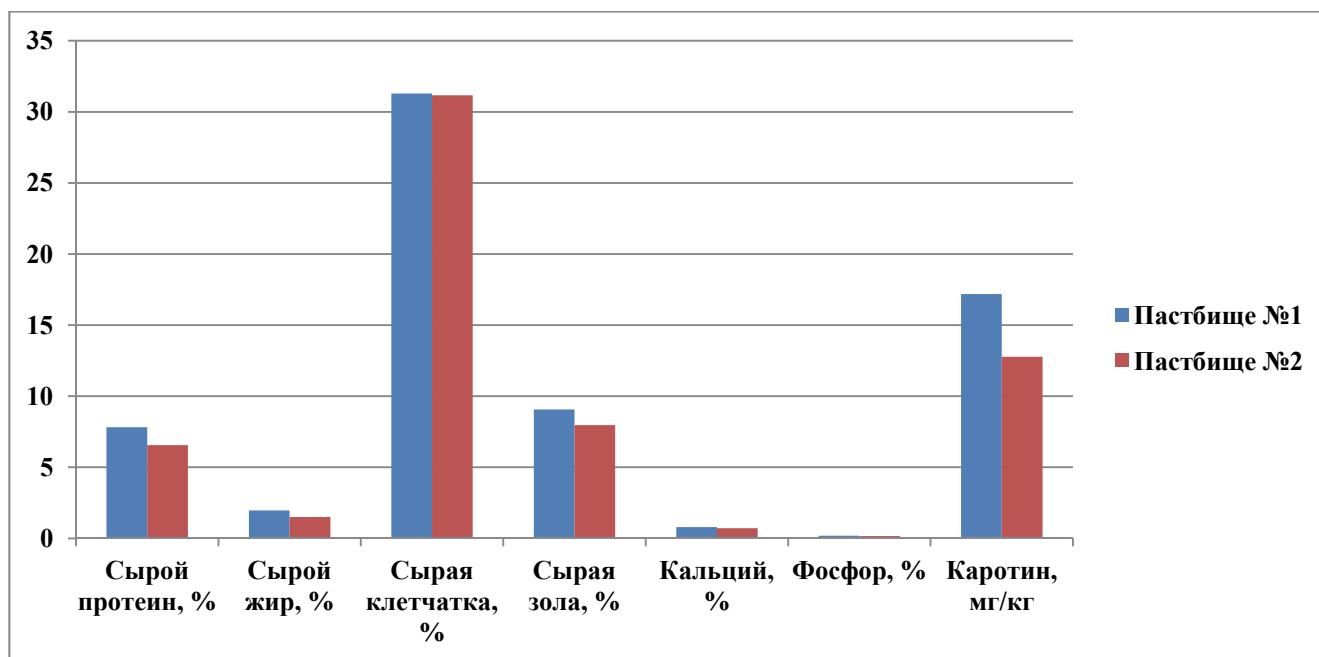


Рисунок 5 – Взаимосвязь вегетационного индекса с химическим составом пастбищных кормов

Дистанционное измерение вегетационного индекса проводили с применением данных спутниковых сервисов и непосредственных измерений при использовании портативного ручного датчика Green Seeker. Исследования проводились на двух пастбищных участках: пастбище №1: NDVI = 0,27, пастбище № 2: NDVI = 0,23 (в среднем на протяжении года).

В ходе проведенного исследования было выявлено, что травостой пастбища №1 по химическому составу превосходил травостой пастбища №2 по показателям - сырой протеин, сырой жир, сырая клетчатка на -19,2%, 31,3% и 0,4% соответственно.

Немаловажным показателем характеристики пастбищ в пастбищном овцеводстве является уровень каротина в растениях, поскольку повышение вегетационного индекса положительно коррелирует с содержанием каротина в пастбищном корме (рис. 6).

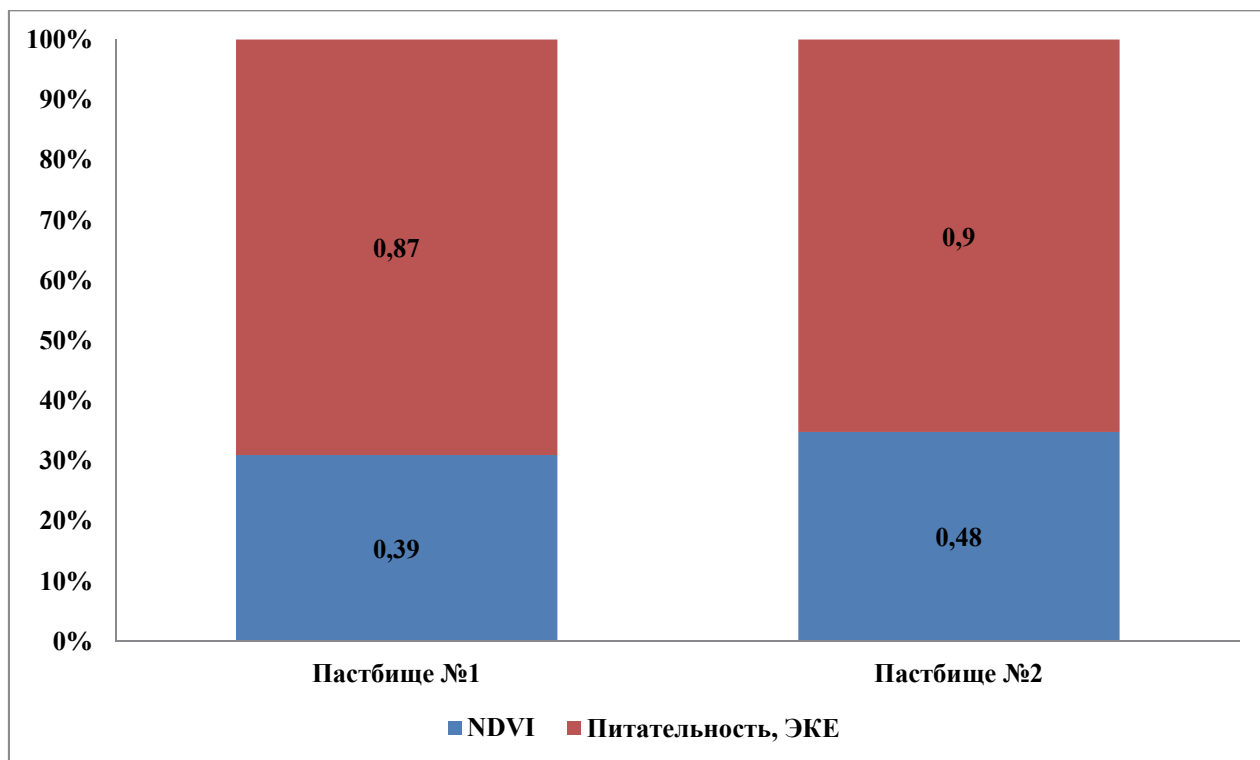


Рисунок 6 – Взаимосвязь NDVI с питательностью кормов

В наших исследованиях содержания каротина в кормах на пастбище №1 было выше на 34,5% по сравнению с кормами на пастбище №2, где вегетационный индекс ниже на 17,4%. Соответственно, выход биомассы с 1 м<sup>2</sup> участка пастбища №1 был выше на 29,1%, а питательность корма больше на 2,1%, по сравнению со вторым участком.

Исследования химического состава и питательной ценности кормовых пастбищных растений позволили провести оценку выхода питательных веществ и энергии с 1 м<sup>2</sup>. По результатам учета живой массы подконтрольных животных было установлено, что живая масса овец выпасавшихся на пастбище №1, статистически достоверно превосходила на 6,2% аналогичный показатель у аналогов, которые выпасались на пастбище №2. Полученные данные позволили установить взаимосвязь между продуктивностью пастбищных угодий и вегетационным индексом, полученным дистанционным методом и проверенным контактном методом при проведении полевых испытаний. На основании полученных результатов была проведена рекомендации по

обоснованию периодов оптимального использования пастбищных участков, основанные на применении цифровых методов дистанционного мониторинга.

Таким образом, разработанная инновационная технология пастбищного животноводства позволит одновременно проводить оценку больших пастбищных участков размерами несколько тысяч гектаров и составлять технологическую карту выпаса животных.

### 3. Результаты оценки производственных показателей технологических групп пастбищных животных, полученные по результатам зоотехнического учета, применяемого в племенном хозяйстве.

Разработка и внедрение инновационных технологий производства продукции животноводства в условиях пастбищного животноводства, ориентированных на достижения V и VI технологического уклада, предусматривает применение дистанционных методов мониторинга производственных процессов, из которых наиболее развито использование БПЛА, спутниковых систем, аэромониторинг.

Оценка продуктивности производственных показателей технологических групп пастбищных животных, полученные с помощью зоотехнического учета на пастбищных участках с применением дистанционных методов аэрокосмического мониторинга местности в зависимости от сезона года представлена в таблице 5.

Таблица 5 - Показатели продуктивных качеств пастбищных животных по сезонам года

| Показатель                            |           | Зимний | Весенний | Летний | Осенний |
|---------------------------------------|-----------|--------|----------|--------|---------|
| живая масса, кг                       | баранчики | 35,4   | 51,8     | 72,9   | 94,5    |
|                                       | ярочки    | 32,1   | 41,5     | 47,8   | 69,8    |
| среднесуточный прирост, г             | баранчики | 115,4  | 187,6    | 197,6  | 196,7   |
|                                       | ярочки    | 115,2  | 143,1    | 128,4  | 106,4   |
| затраты корм. ед.                     |           | 7,4    | 7,4      | 9,7    | 10,7    |
| нагрузка поголовья на 1 га, усл. гол. |           | -      | -        | 0,6    | 0,6     |

Дистанционный мониторинг распределения растительных остатков на пастбищных участках и участках для выпаса животных позволяет определить наиболее оптимальные зоны с максимальным выходом растительной биомассы, которая конвертируется в прирост биомассы пастбищных животных.

Результаты оценки производственных показателей технологических групп пастбищных животных (овцы породы джалгинский меринос), полученные по результатам зоотехнического учета в племенном

животноводстве показали, что на протяжении пастбищного периода нагрузка подопытных животных на 1 га пастбищных участков составляла 0,6 гол./га. Средняя живая масса подопытных животных (баранчиков и ярочек) соответствовала нормативным требованиям и составляла, по периодам, кг: 32,1-35,4 (зимний период), 41,5-51,8 (весенний период), 47,8-72,9 (летний период) и 69,8-94,5 (осенний период). Среднесуточный прирост живой массы (г) находился в интервале, с учетом сезона года, 115,4-197,6 (баранчики) и 106,4-143,1 (ярочки). Затраты кормов на прирост 1 кг живой массы находились в пределах 7,4-11,0 кормовых единиц.

В своих исследованиях S. M. Punalekar, A. Verhoef так же говорят о необходимости мониторинга пастбищных угодий для своевременного влияния на их продуктивность, что в дальнейшем позволит повысить эффективность введения пастбищного животноводства [14].

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.

#### **4. Методические подходы по обоснованию периодов оптимального использования пастбищных участков, основанные на применении различных дистанционных методов мониторинга вегетационного индекса растительности, оценки питательной ценности пастбищных кормов.**

По данным многолетних исследований Всероссийского научно-исследовательского института кормов им. В.Р. Вильямса биологическая продуктивность пастбищ юга России в широких пределах колеблется по годам. Так же отмечается сезонное колебание, где запас кормов в осенне-зимний период уменьшается в 2-3 раза. Стоит отметить, что наряду с этим, пастбищные территории вследствие нерациональной и экологически бесхозяйственной деятельности деградировали, большая часть природных пастбищ подвержены опустыниванию, что ведет к снижению их продуктивности.

Для существенного улучшения сложившейся ситуации считаем необходимым разработать рациональные системы использования пастбищных экосистем на основе пастбищеоборотов с внедрением дистанционных методик оценки оптимального их использования.

В качестве объективно наблюдаемых данных о текущем состоянии пастбищ использовались мультиспектральные снимки космических спутников дистанционного зондирования Земли Copernicus Sentinel-2 Европейского космического агентства (ESA). Спутники обеспечивают временное разрешение порядка 5 дней и пространственное разрешение от 10м до 60м в зависимости от спектрального диапазона.

Характеристики диапазонов наблюдения с пространственным разрешением 10 м, задействованные в работе, представлены ниже (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>).

Пространственное разрешение 10 метров (рис.7):

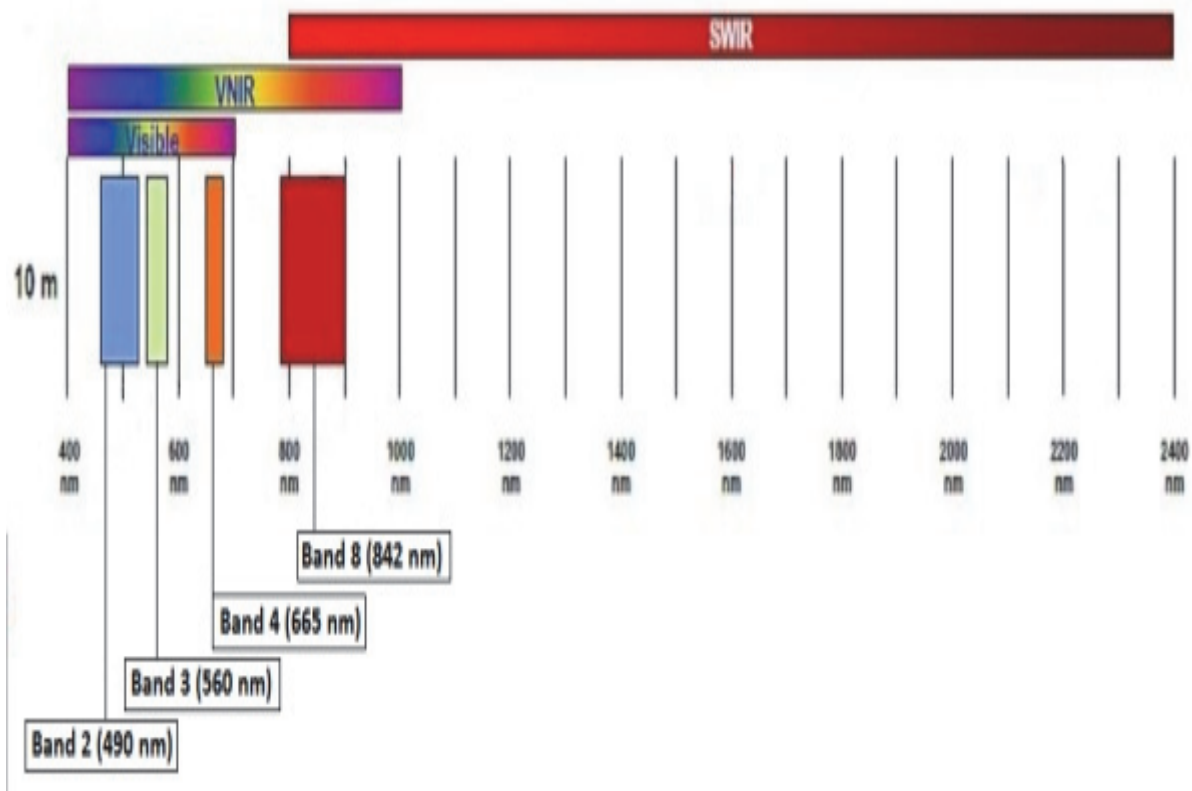


Рисунок 7 - SENTINEL-2 10-метровые полосы пространственного разрешения: B2 (490 нм), B3 (560 нм), B4 (665 нм) и B8 (842 нм)

Таблица 6 - Полосы пространственного разрешения 10 м и соответствующее отношение сигнал / шум (SNR)

| Номер диапазона | S2A                          |                         | S2B                          |                         | $L_{исх.}$<br>(эталонное сияние)<br>(Вт · м – 2 ср – 1 мкм – 1) | SNR @ $L_{ref}$ |
|-----------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|---|-----------------|
|                 | Центральная длина волны (нм) | Полоса пропускания (нм) | Центральная длина волны (нм) | Полоса пропускания (нм) |   |                 |
| 2               | 492,4                        | 66                      | 492,1                        | 66                      | 128   | 154             |
| 3               | 559,8                        | 36                      | 559,0                        | 36                      | 128   | 168             |
| 4               | 664,6                        | 31 год                  | 664,9                        | 31 год                  | 108   | 142             |
| 8               | 832,8                        | 106                     | 832,9                        | 106                     | 103   | 174             |

В отношении дистанционного контроля биологического состояния растительности наибольшее распространение получил индекс NDVI, значение которого определяется отражательной способностью растений в красном B4 и ближнем инфракрасном B8 диапазонах. Расчет этого индекса выполняется по формуле

$$NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4) \quad (1)$$



Расчет вегетационного индекса NDVI проводили с использованием программы QGIS. QGIS это дружественная к пользователю географическая информационная система (ГИС) с открытым кодом, распространяющаяся под GNU General Public License. QGIS является проектом Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

В программе QGIS процедура вычисления индекса NDVI выполняется с помощью специального инструмента – Калькулятора растров, окно которого представлено на рисунке 8.

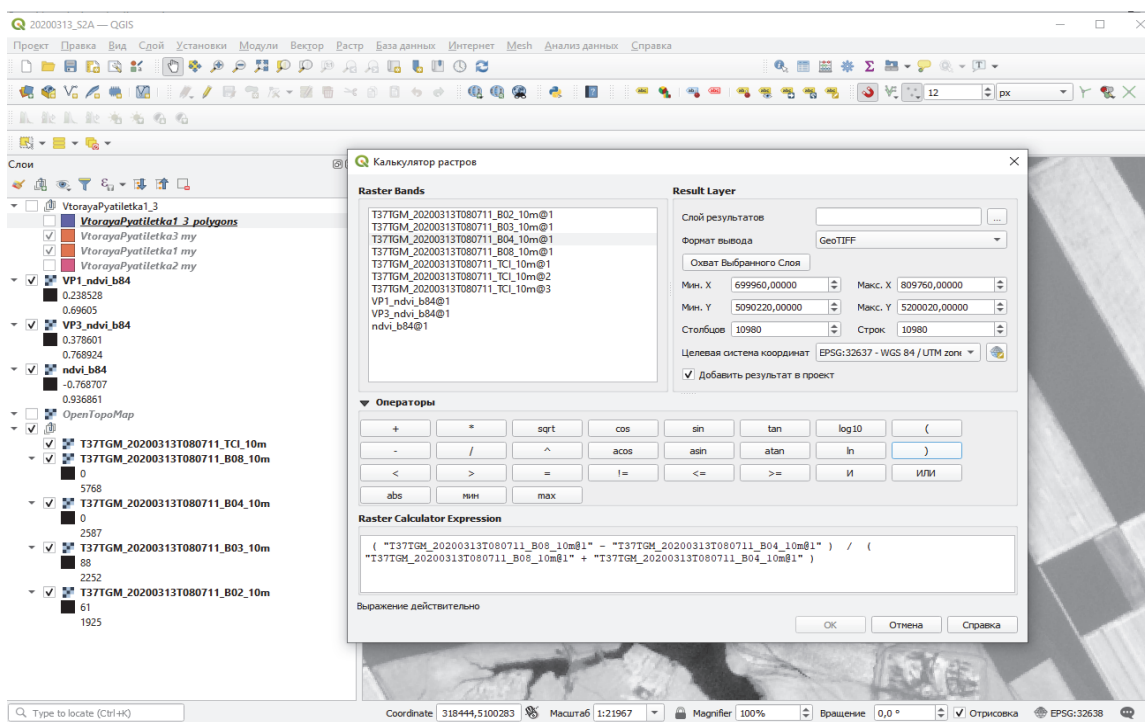


Рисунок 8 – Калькулятор растров QGIS 3.14

Результат работы данного инструмента – новый монохромный слой следующего вида (рис. 9).

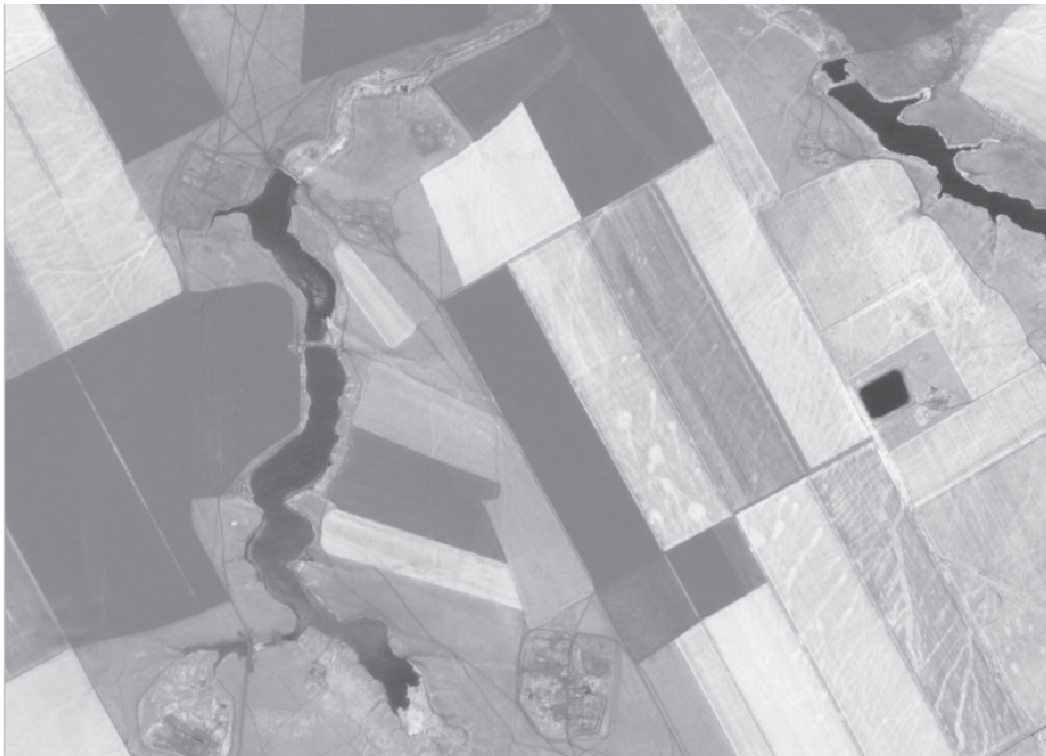


Рисунок 9 – Слой рассчитанного индекса NDVI по спектральным составляющим B8 и B4

После создания полигонов, соответствующих исследуемым пастбищам, с помощью инструмента QGIS: Растр-Извлечение-Обрезать растр по маске, получим пространственное распределение NDVI по исследуемым объектам, как показано на рисунках 10 и 11.

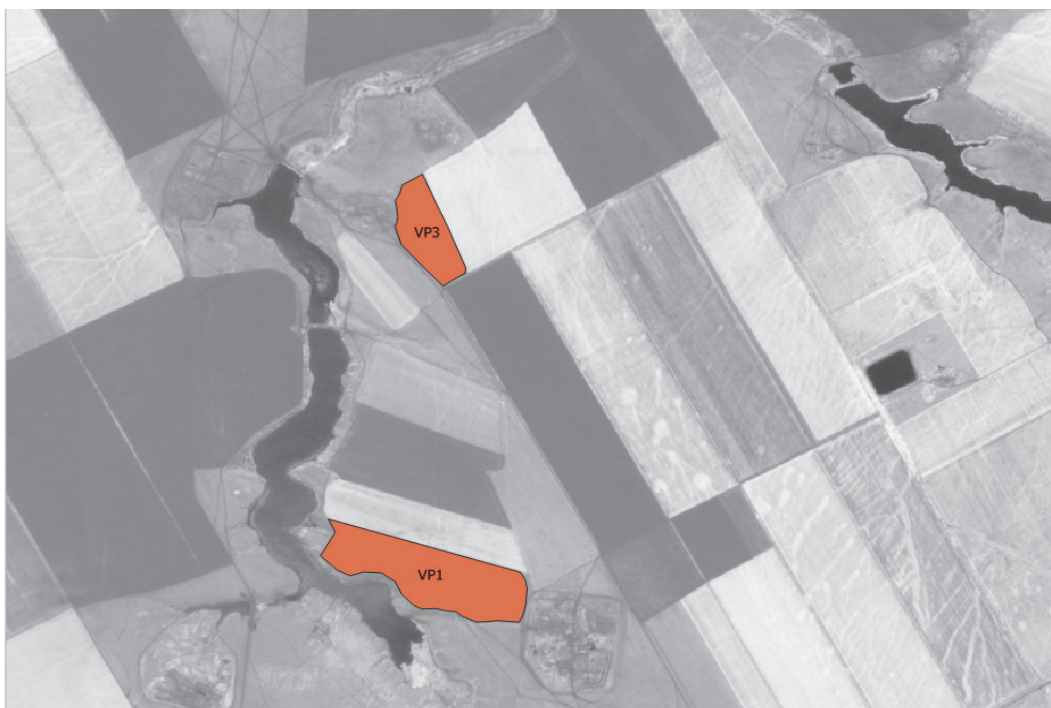


Рисунок 10 - Исследуемые пастбища

fw2



Рисунок 11 - пространственное распределение NDVI

Выполнив предварительную статистическую обработку полученных NDVI-изображений пастбищ построим распределения количества пикселей изображений, соответствующих определенным значениям NDVI, в виде гистограмм, представленных на рисунках 12-14.

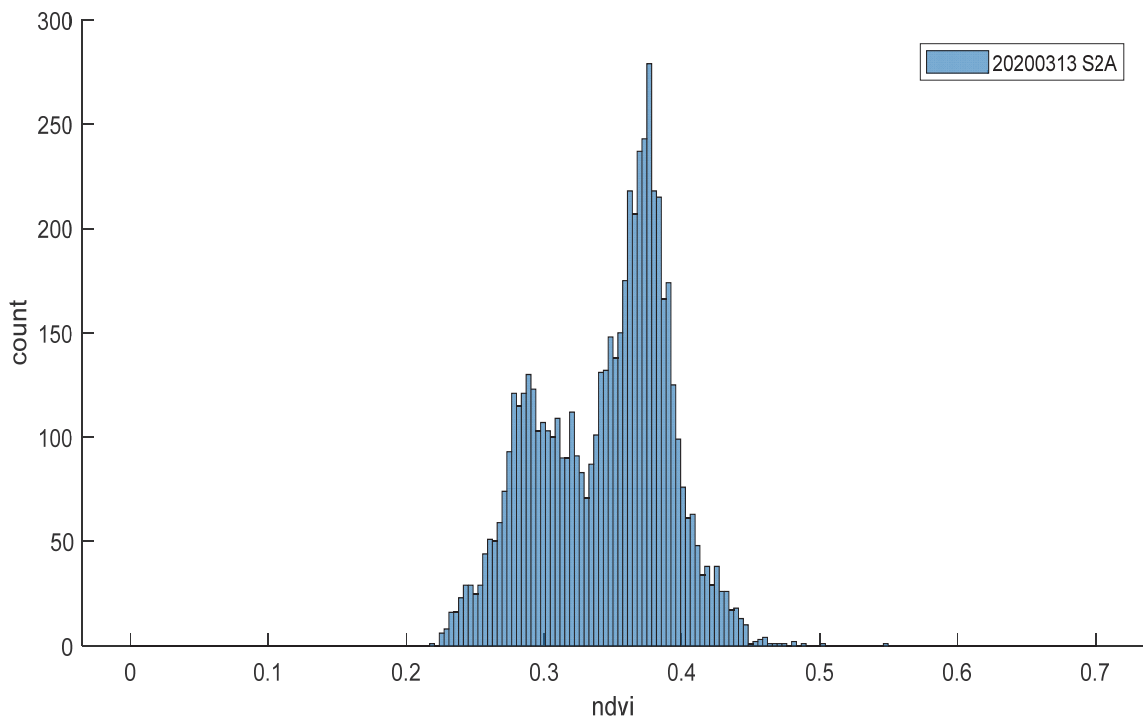


Рисунок 12- Частоты распределения пикселей по значениям NDVI для съемки 03.03.2020

Таблица 7 – Временной ряд наблюдений

| Дата наблюдения | Порядковый номер дня от 01.01.2020 г. |
|-----------------|---------------------------------------|
| 13-Mar-2020     | 73                                    |
| 28-Mar-2020     | 88                                    |
| 12-Apr-2020     | 103                                   |
| 12-May-2020     | 133                                   |
| 27-May-2020     | 148                                   |
| 21-Jun-2020     | 173                                   |
| 11-Jul-2020     | 193                                   |
| 16-Jul-2020     | 198                                   |
| 26-Jul-2020     | 208                                   |
| 10-Aug-2020     | 223                                   |
| 20-Aug-2020     | 233                                   |
| 30-Aug-2020     | 243                                   |
| 09-Sep-2020     | 253                                   |
| 14-Sep-2020     | 258                                   |
| 24-Sep-2020     | 268                                   |
| 09-Oct-2020     | 283                                   |
| 14-Oct-2020     | 288                                   |
| 08-Nov-2020     | 313                                   |

Гистограммы для представленных дат наблюдения, представлены на рисунках 13 и 14.

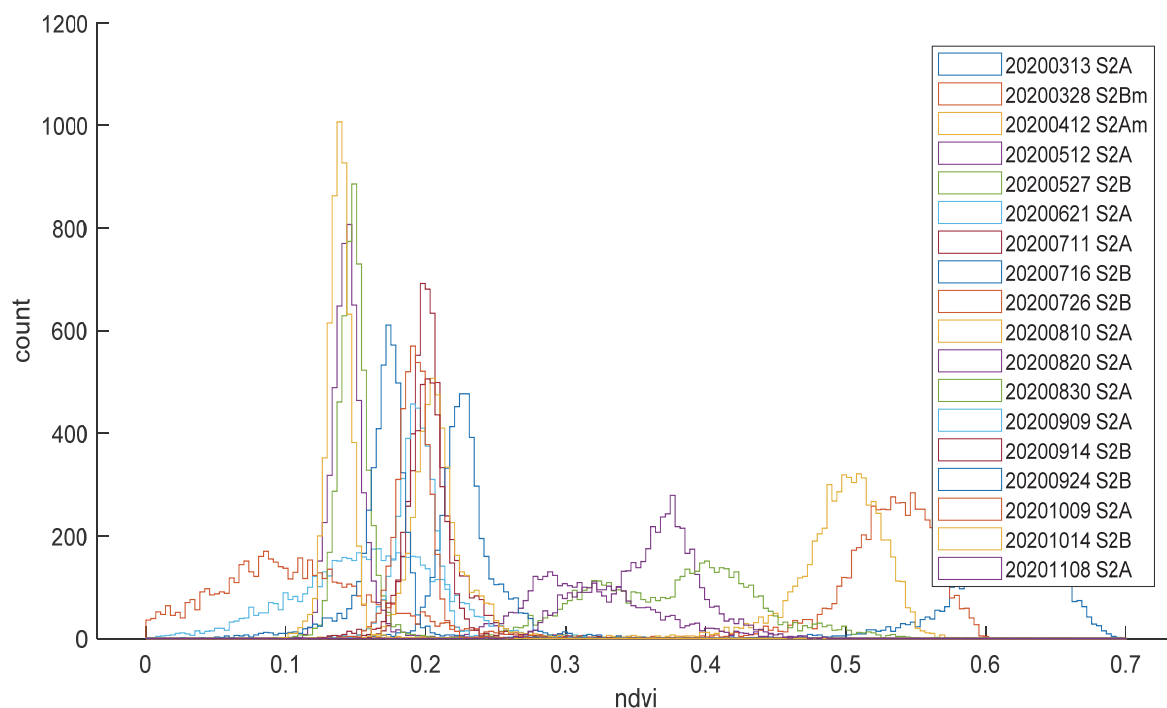


Рисунок 13 - Частоты распределения пикселей по значениям NDVI по датам съемки пастбище №1.

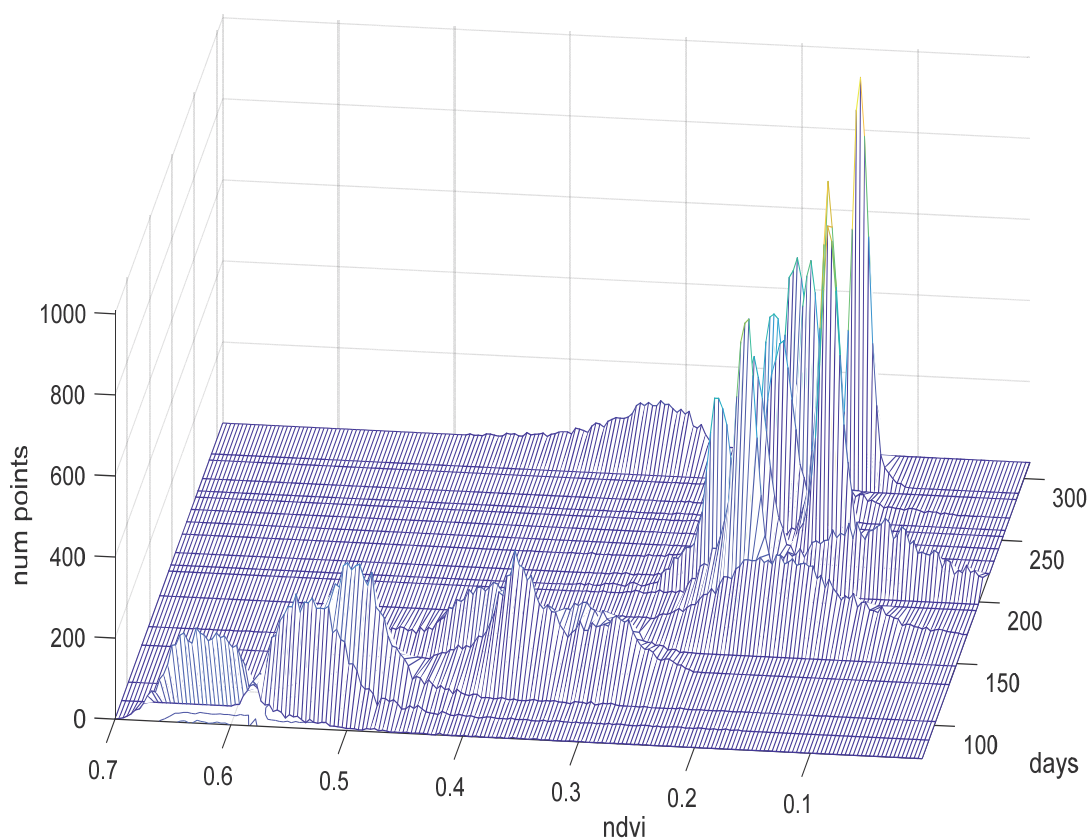


Рисунок 14 - Частоты распределения пикселей по значениям NDVI по дням съемки пастбище №1

Из рисунков видно, что эмпирические распределения значений NDVI существенно меняются во времени. Использование всей имеющейся информации предполагается на следующих этапах исследования с применением технологий анализа больших данных. На данном этапе ограничимся традиционными статистическими методами с использованием оценок основных числовых характеристик распределений. Так на рисунке представлен график изменения среднего значения в коридоре стандартного отклонения (среднего квадратического отклонения) (рис. 15).

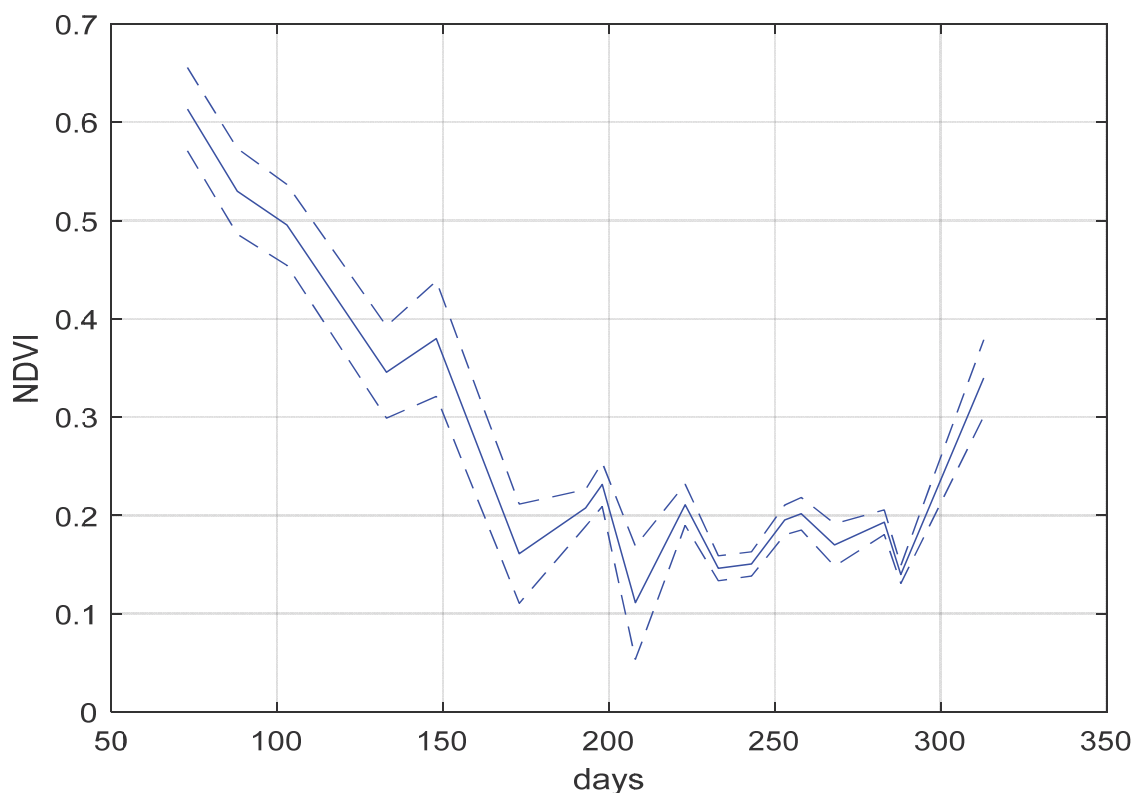


Рисунок 15 - Среднее значение NDVI и SKO-коридор по дням наблюдений пастбище №1

При этом, основные показатели характеризующие питательную ценность исследуемого пастбища, определенные в условиях лаборатории НТЦ «Корма и обмен веществ», изменяются. На рисунке 16 данные изменения отображены графически.

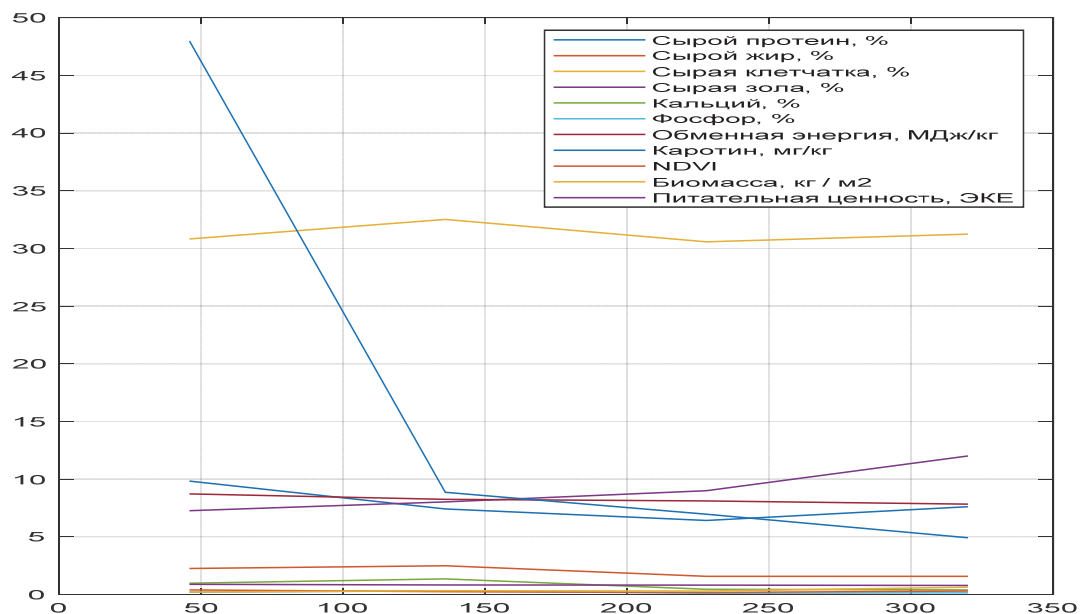


Рисунок 16 - Показатели пастбища №1 по дням наблюдения

Задача исследования состоит, в том числе, в установлении тесноты и закона статистической связи между параметрами дистанционного зондирования, такими как индекс NDVI, и показателями продуктивности пастбищ.

Рассмотрим взаимосвязь NDVI и выхода массы кормов с  $\text{м}^2$  (рис. 17).

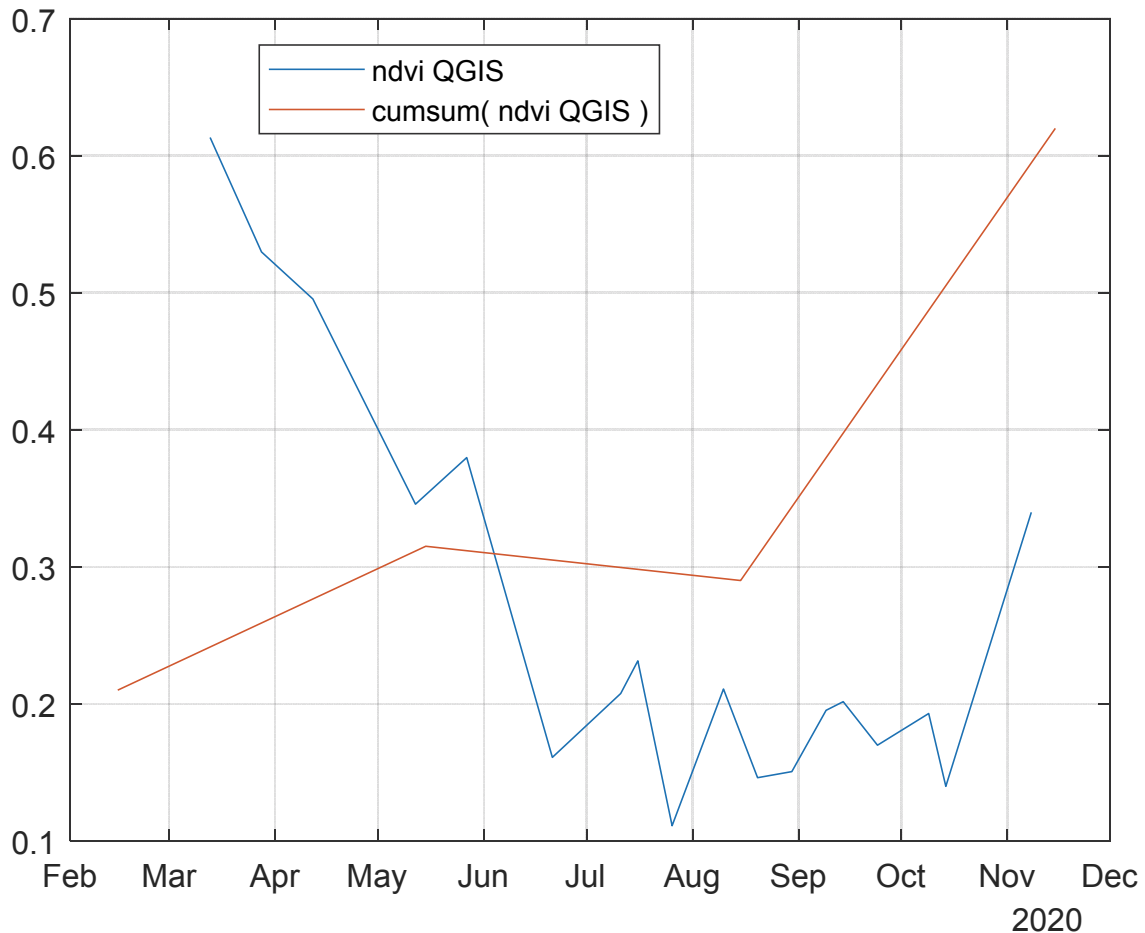


Рисунок 17 – Временные ряды NDVI и Биомасса ( $\text{кг}/\text{м}^2$ )

Визуально наличие статистической связи не наблюдается. Этот же вывод подтверждается и компьютерными экспериментами с различными модельными регрессиями. Временной ряд NDVI неплохо аппроксимируется полиномом 2-го порядка, в то время как биомасса имеет выраженную линейную тенденцию. Последнее имеет биологическое объяснение. Биомасса накапливается в течение сезона. Это дает основание использовать в качестве второго регрессора время – линейно-нарастающую функцию, как показано на рисунке 18.

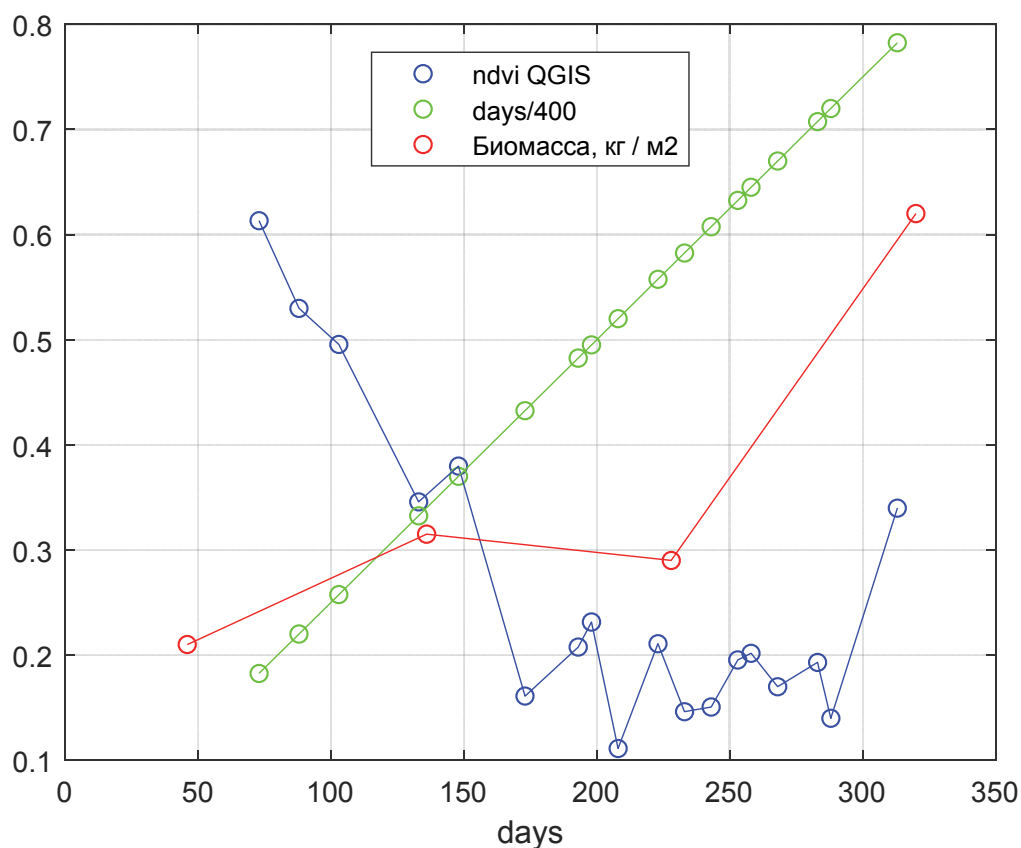


Рисунок 18 – Временные ряды NDVI, время (дней/400) и Биомасса (кг/м<sup>2</sup>)

В этом случае, когда  $x_1=NDVI$ ;  $x_2=days$ ;  $y=BM$  (Биомасса), уравнение линейной множественной регрессии примет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 . \quad (2)$$

Статистические характеристики модели сведены в таблицу 8.

Таблица 8 - Статистические характеристики модели

| Коэффициент | Оценка значения | Стандартная ошибка | t-статистика | Уровень значимости |
|-------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|
| $b_0$       | -0.13355        | 0.025308           | -5.277       | 8.0028e-07         |
| $b_1$       | 0.45674         | 0.038022           | 12.013       | 6.6143e-21         |
| $b_2$       | 0.65909         | 0.029308           | 22.488       | 2.9364e-40         |

Root Mean Squared Error: 0.0278

R-squared: 0.882, Adjusted R-Squared 0.88

Модель является статистически значимой. Скорректированный коэффициент детерминации равен Adjusted R-Squared = 0.88. Временной ряд оценки Биомассы –  $Y_{estim}$  представлен на рисунке 19.



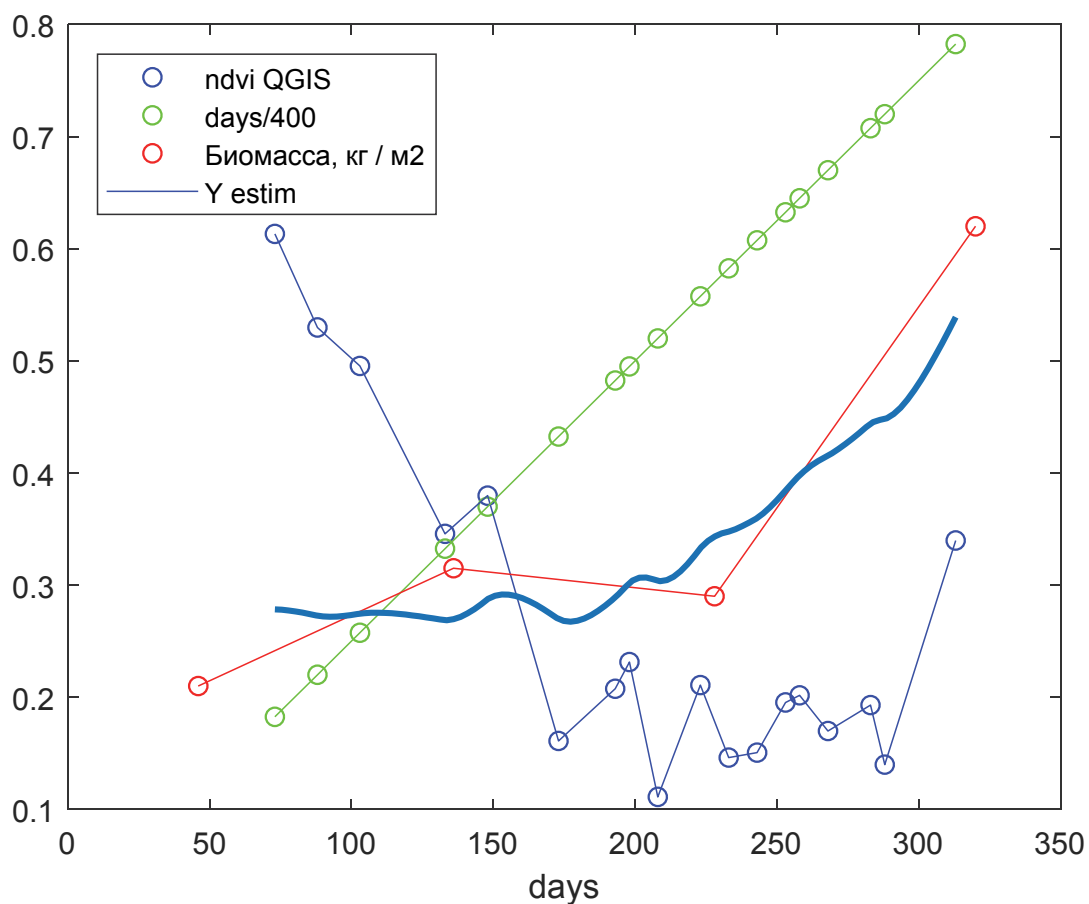


Рисунок 19 – Факторные признаки, результативный признак и его оценка

Рассмотренная выше линейная функция времени как регрессор соответствует тенденции изменения результативного признака, однако она не учитывает характер изменения индекса NDVI. Представляется, что в качестве альтернативы можно использовать накопленную сумму (cumsum) значений NDVI.

На рисунке 20 показаны временные ряды факторных признаков – NDVI и cumsum(NDVI), а также результативного признака – биомассы.

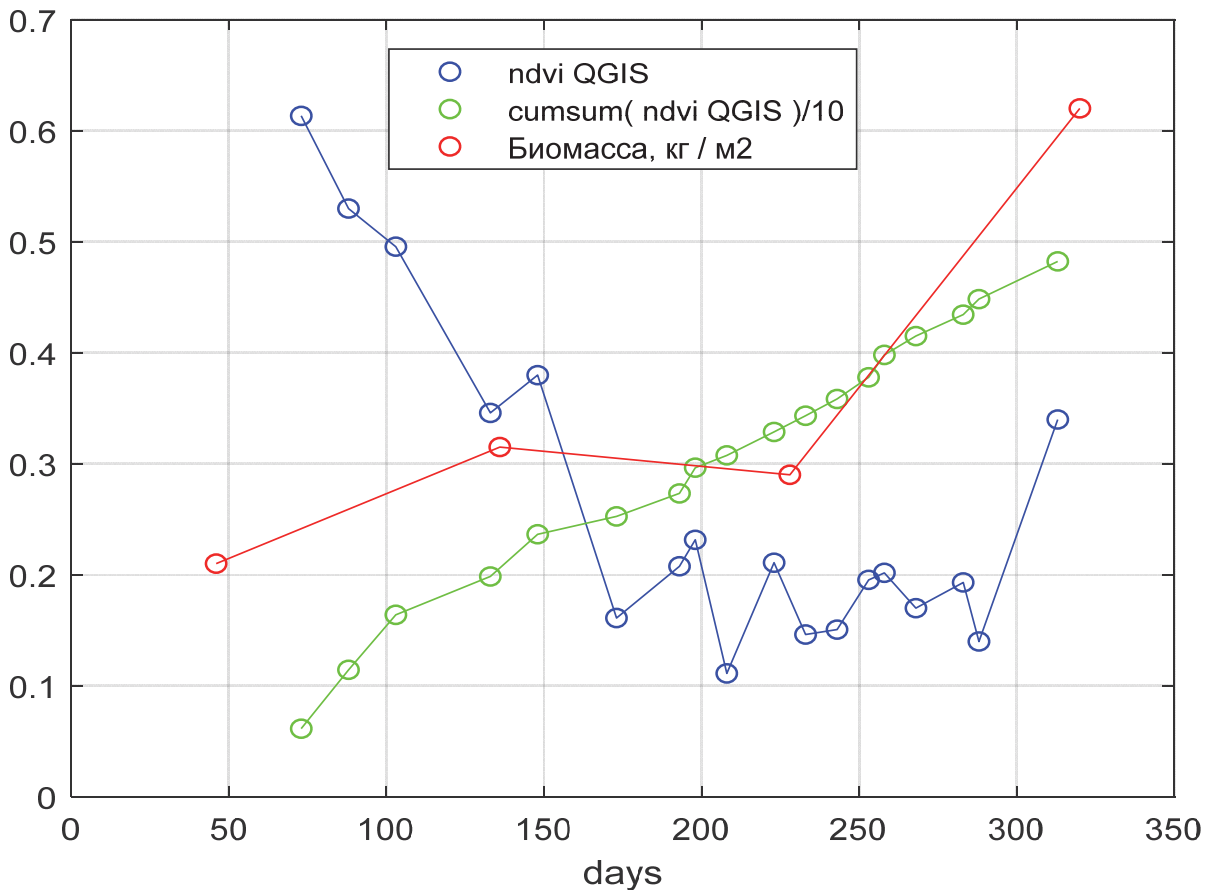


Рисунок 20 – Временные ряды NDVI, время (дней/400) и Биомасса (кг/м<sup>2</sup>)

Для улучшения работы алгоритма выполним сглаживание (аппроксимацию) используемых временных рядов. Для случае, когда  $x_1 = \text{NDVI}$ ;  $x_2 = \text{cumsum}(\text{NDVI})$ ;  $y = \text{BM}$  (Биомасса), уравнение линейной множественной регрессии, по-прежнему, примет вид (2). Статистические характеристики модели сведены в таблицу 9.

Таблица 9 - Статистические характеристики модели

| Коэффициент | Оценка значения | Стандартная ошибка | t-статистика | Уровень значимости |
|-------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|
| $b_0$       | -0.12212        | 0.018504           | -6.5996      | 2.1904e-09         |
| $b_1$       | 0.48237         | 0.029284           | 16.472       | 7.3811e-30         |
| $b_2$       | 0.11465         | 0.0037922          | 30.234       | 3.5906e-51         |

Root Mean Squared Error: 0.0215

R-squared: 0.93, Adjusted R-Squared 0.928

Скорректированный коэффициент детерминации несколько выше, чем в предыдущей модели и составляет Adjusted R-Squared = 0.928.

Временной ряд оценки Биомассы –  $Y_{estim}$  представлен на рисунке 21, факторные признаки и результирующий признак представлены в приложении Д.

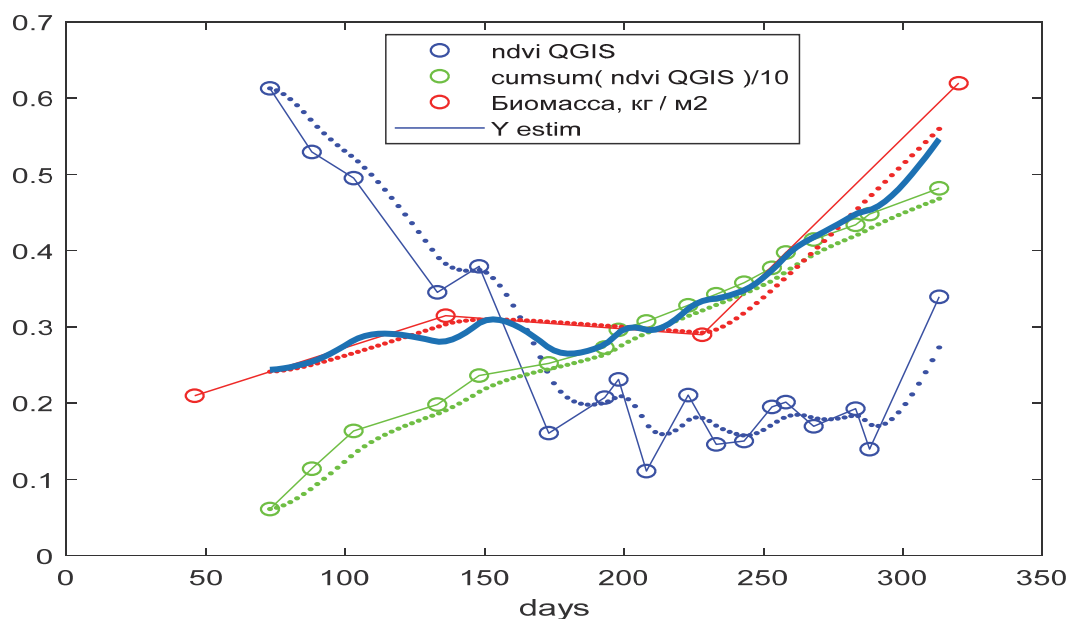


Рисунок 21 – Факторные признаки, результирующий признак и его оценка

Таким образом, модель множественной линейной регрессии биомассы по среднему значению индекса NDVI и его накопленной сумме является статистически значимой с высоким значением индекса детерминации, а потому может быть использована для дистанционной оценки этого показателя.

Рассмотрим взаимосвязь NDVI и питательной ценности кормов выражаемая в энергетических кормовых единицах (рис. 22).

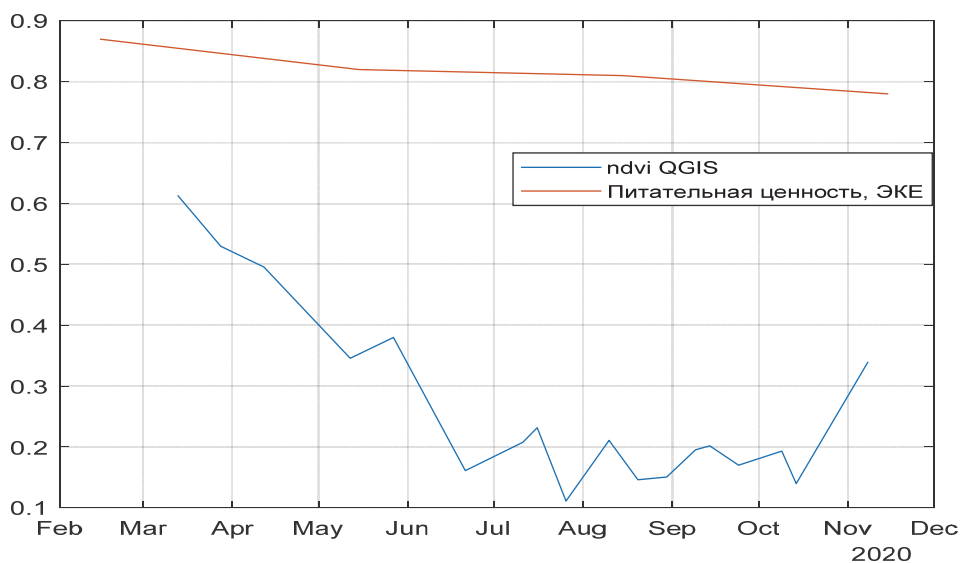


Рисунок 22 – Временные ряды NDVI и питательная ценность

Из рисунка 22 видно, что временной ряд питательной ценности, также как в предыдущем случае для биомассы, имеет выраженную линейную тенденцию. Поэтому, помимо ряда NDVI в качестве второго регрессора будем использовать ряд его накапливаемой суммы (cumsum).

На рисунке 23 показаны временные ряды двух факторных признаков – NDVI и cumsum NDVI, а также результирующего признака – питательной ценности.

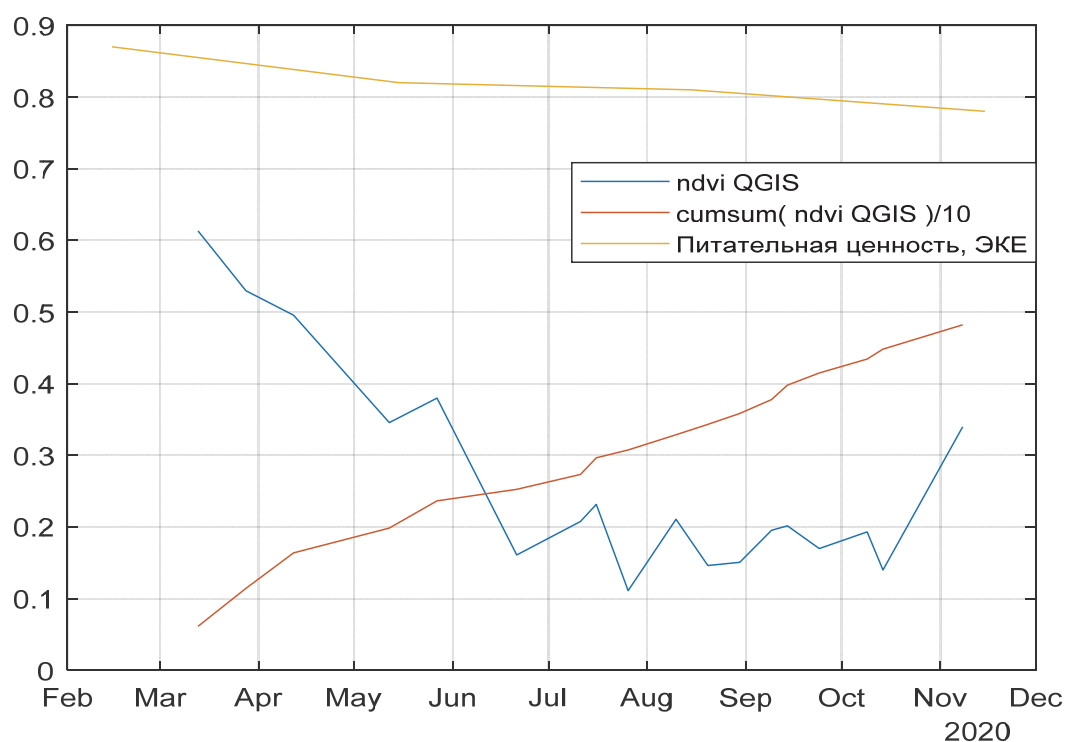


Рисунок 23 – Временные ряды NDVI, cumsum NDVI и Питательной ценности, ЭКЕ

Для увеличения точек наблюдения выполним кусочно-линейную интерполяцию используемых временных рядов, как показано на рисунке 24.

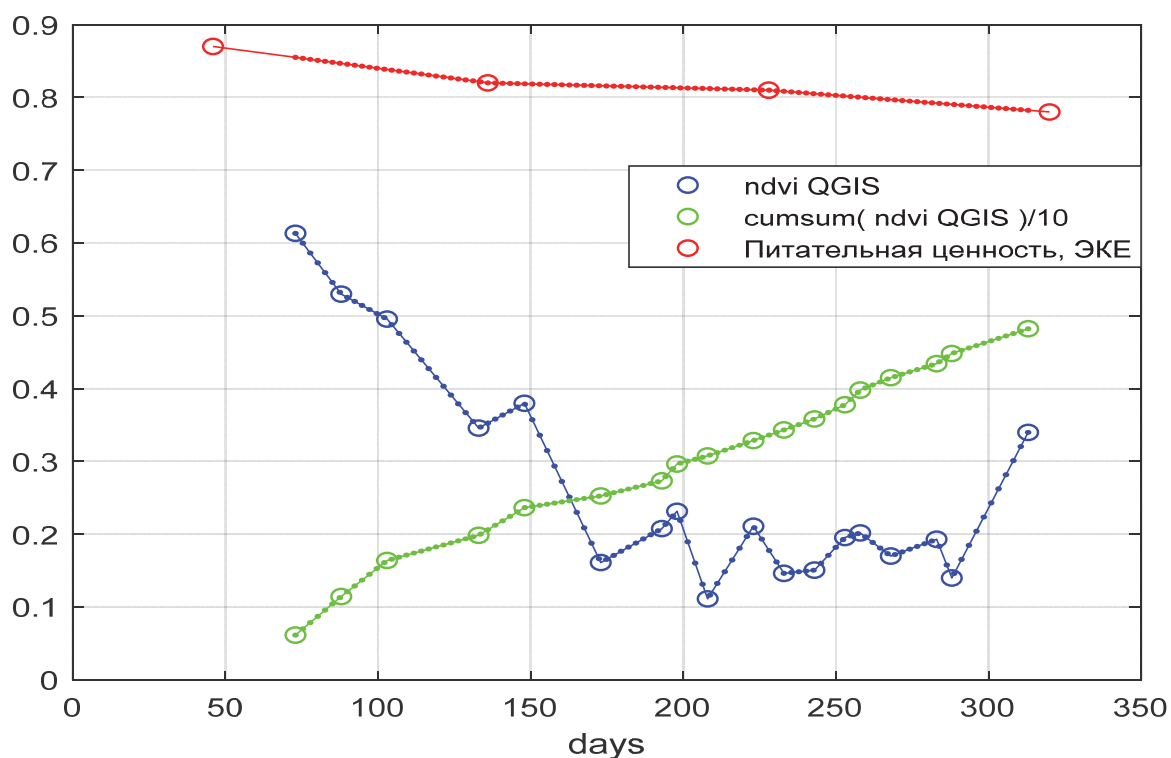


Рисунок 24 – Кусочно-линейная интерполяция временных рядов NDVI, cumsum NDVI и Питательной ценности, ЭКЕ

Для улучшения работы алгоритма выполним предварительное сглаживание (аппроксимацию) используемых временных рядов используя метод экспоненциальной средней

```

alf=0.2; % параметр сглаживания
y_exp_smooth=zeros(length(ym),1);
y_exp_smooth(:,1)=ym; %
for i=2:length(daysm);
    y_exp_smooth(i,1)=alf*ym(i) + (1-alf)*y_exp_smooth(i-1,1);
end

```

Результат сглаживания представлен на рисунке 25.

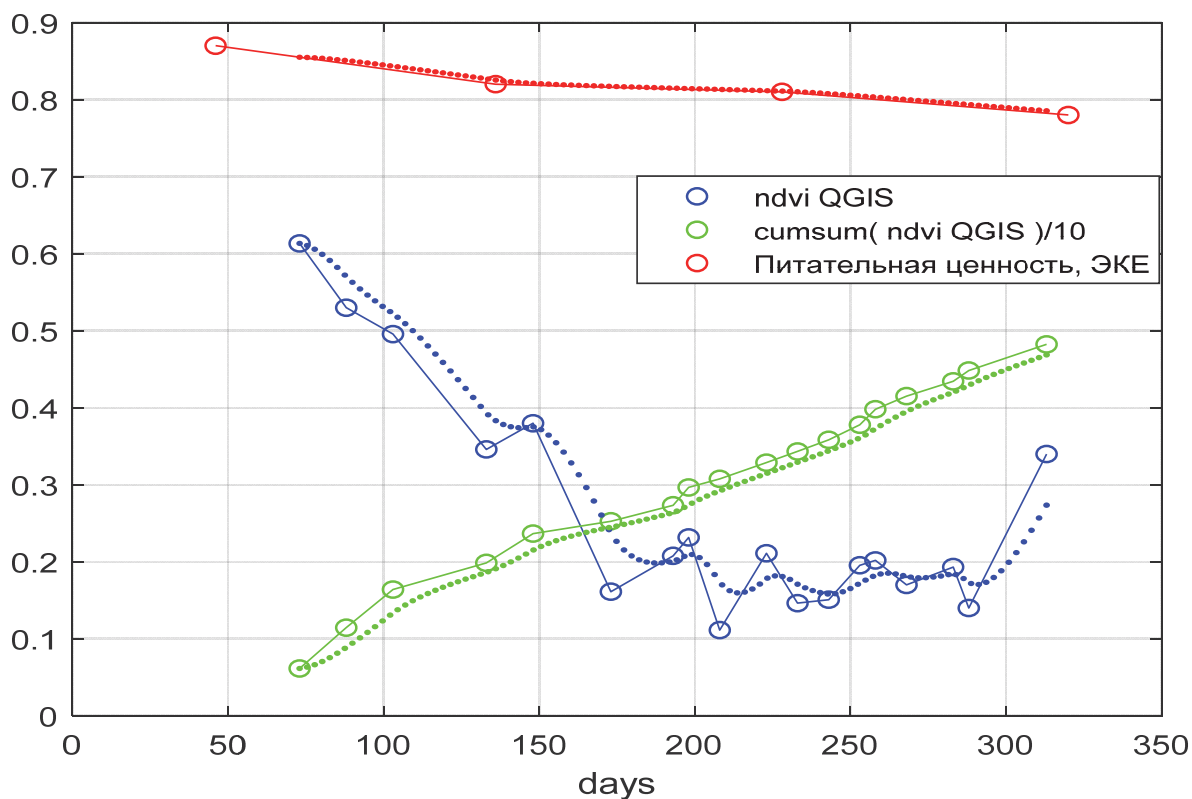


Рисунок 25 – Исходные и smoothed временные ряды NDVI, cumsum NDVI и Питательной ценности, ЭКЕ

Выполним идентификацию коэффициентов множественной линейной регрессии, а также оценим их значимость для случая, когда  $x_1=NDVI$ ;  $x_2=cumsumNDVI$ ;  $y=PC$  (питательная ценность). Уравнение линейной множественной регрессии, имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 = (1 \ x_1 \ x_2)(b_0 \ b_1 \ b_2)^T. \quad (3)$$

Статистические характеристики модели сведены в таблицу 10

Таблица 10 - Статистические характеристики модели

| Коэффициент | Оценка значения | Стандартная ошибка | t-статистика | Уровень значимости |
|-------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|
| $b_0$       | 0.84885         | 0.0024337          | 348.79       | 4.1724e-152        |
| $b_1$       | 0.019512        | 0.0038515          | 5.0662       | 1.9367e-06         |
| $b_2$       | -0.013771       | 0.00049876         | -27.611      | 9.6291e-48         |

Root Mean Squared Error: 0.00282

R-squared: 0.977, Adjusted R-Squared 0.976

Высокий уровень значения скорректированного коэффициента детерминации свидетельствует о высоком качестве регрессионной модели. Это подтверждается также графическим представлением оценки Питательной ценности ( $Y_{estim}$ ), график которой практически сливается с соответствующим рядом измерений (рис. 26). Факторные признаки и результативный признак представлены в приложении Е.

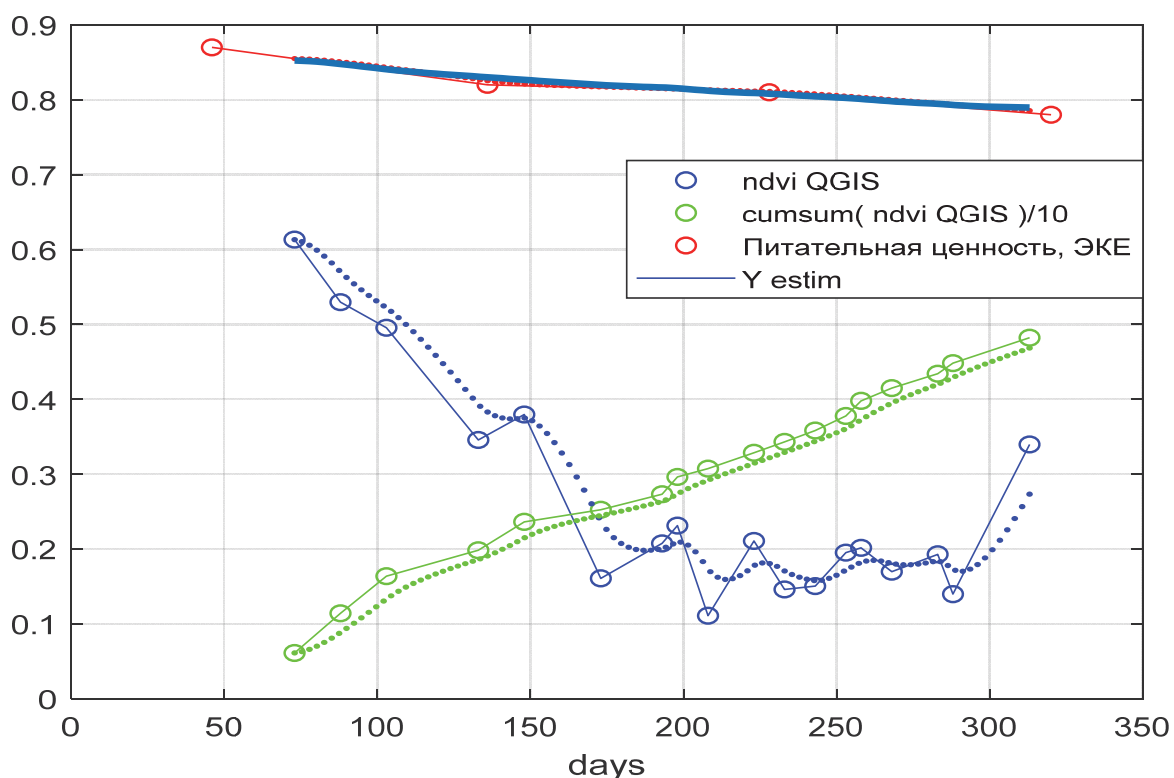


Рисунок 26 – Факторные признаки, результативный признак и его оценка

Таким образом, модель множественной линейной регрессии Питательной ценности по среднему значению индекса NDVI и его накопленной сумме является статистически значимой с высоким значением индекса детерминации, а потому может быть использована для дистанционной оценки этого показателя.

### ***Оценка влияния температуры и количества осадков на значение биомассы.***

Выше была рассмотрена статистическая модель выхода биомассы, как множественной линейной регрессии от двух регрессоров – индекса NDVI и его

накапливаемой суммы. Качество модели характеризуется достаточно высоким значением скорректированного коэффициента детерминации  $adjR^2 = 0.928$ . Однако неисследованным является вопрос использования для моделирования рассматриваемого результативного признака текущих значений температуры и количества осадков.

Воспользуемся указанными данными, используя сервис <https://rp5.ru>.

В графическом виде используемые признаки представлены на рисунке 27.

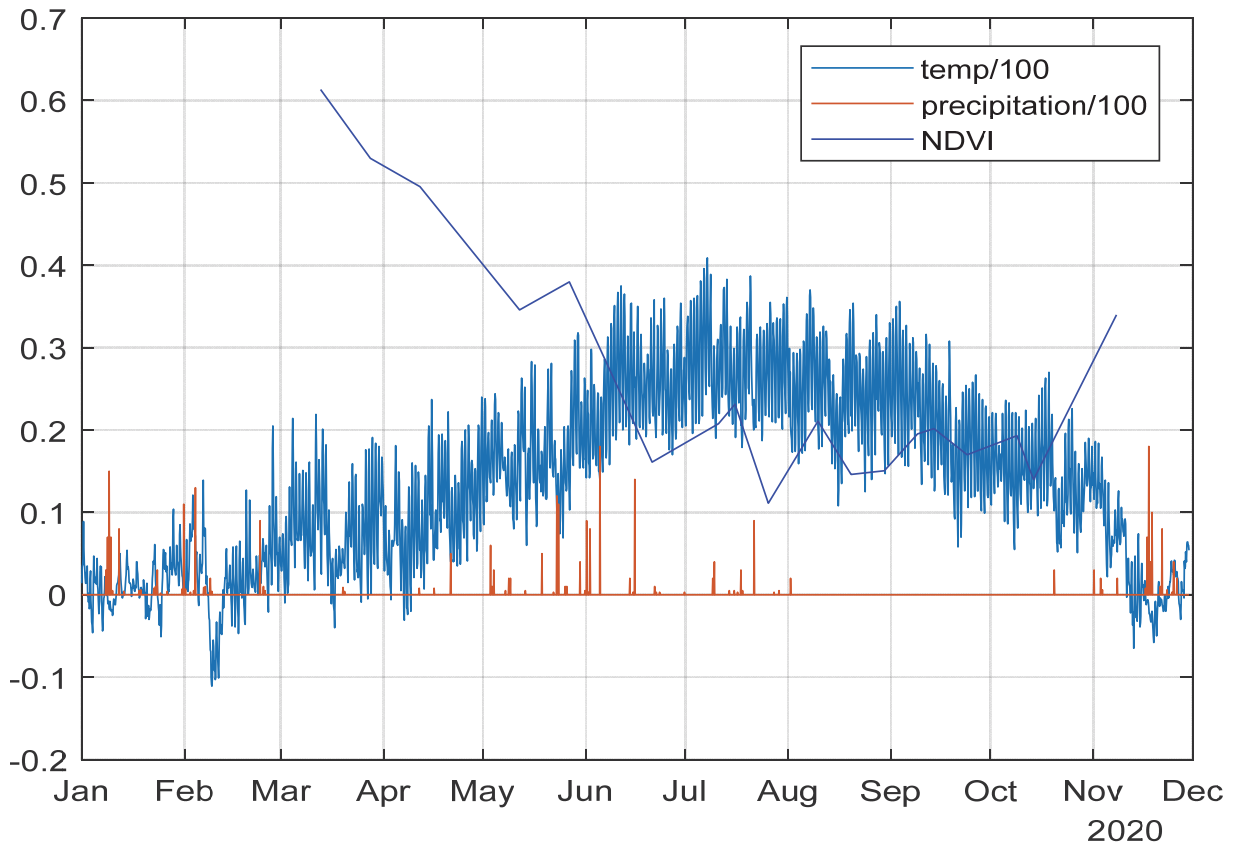


Рисунок 27 – Ряды факторных признаков: Температура/100, °С., количество осадков (precipitation)/100, мм, NDVI

Используя систему вычислений MatLab исследуем модель биомассы как линейную регрессию по трем признакам:  $x_1 = NDVI$ ;  $x_2 = cumsum(NDVI)$ ;  $x_3 = temperature$ . Уравнение регрессии примет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 = (1 \ x_1 \ x_2 \ x_3) (b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3)^T \quad (3)$$

Статистические характеристики модели сведены в таблицу 11.



Таблица 11 - Статистические характеристики модели

| Коэффициент | Оценка значения | Стандартная ошибка | t-статистика | Уровень значимости |
|-------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------------|
| $b_0$       | -0.031625       | 0.08673            | -0.36464     | 0.71618            |
| $b_1$       | 0.35741         | 0.12061            | 2.9633       | 0.0038374          |
| $b_2$       | 0.10551         | 0.0093656          | 11.265       | 2.9351e-19         |
| $b_3$       | -0.0015635      | 0.001464           | -1.0679      | 0.28822            |

Root Mean Squared Error: 0.0214

R-squared: 0.931, Adjusted R-Squared 0.929

Результаты моделирования представлены на рисунке 28

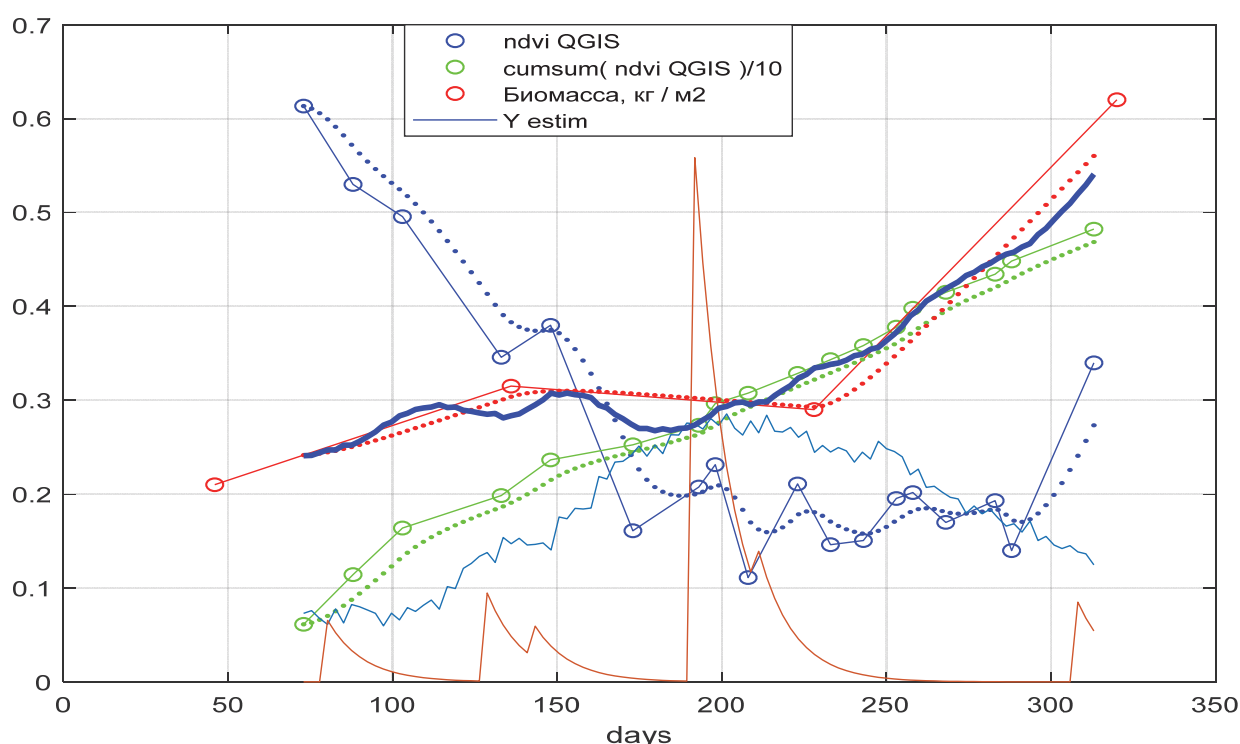


Рисунок 28 – Факторные признаки, результативный признак и его оценка

Данная модель по показателю Adjusted R-Squared практически не отличается от рассмотренной выше модели с двумя регрессорами (NDVI и cumsum(NDVI)). Однако статистическая значимость ее коэффициентов стала существенно ниже, что свидетельствует о ее низком качестве и о существенной зависимости такого показателя как биомасса от текущего значения температуры.

Аналогичный результат наблюдается и в случае использования в качестве регрессора количества выпавших осадков.

Таким образом, индекс NDVI и его накапливаемая сумма в полном мере являются достаточными признаками для оценки и прогнозирования основных показателей пастбища.

Имея вышеперечисленные данные возможно составить прогноз продуктивности пастбищного травостоя.

Поскольку модель развития биомассы представляет собой регрессию на значениях NDVI и их накапливаемой суммы, то прежде следует исследовать прогностические модели регрессоров, в частности NDVI.

Будем рассматривать класс полиномиальных моделей, которые по ряду причин получили наибольшее распространение.

На рисунке 29 представлен временной ряд наблюдаемых значений NDVI, его полиномиальная модель 2-го порядка, а также 95% доверительные границы возможных значений этого показателя. В правой части рисунка, после вертикальной штриховки, приведены прогнозные значения рассматриваемых параметров.

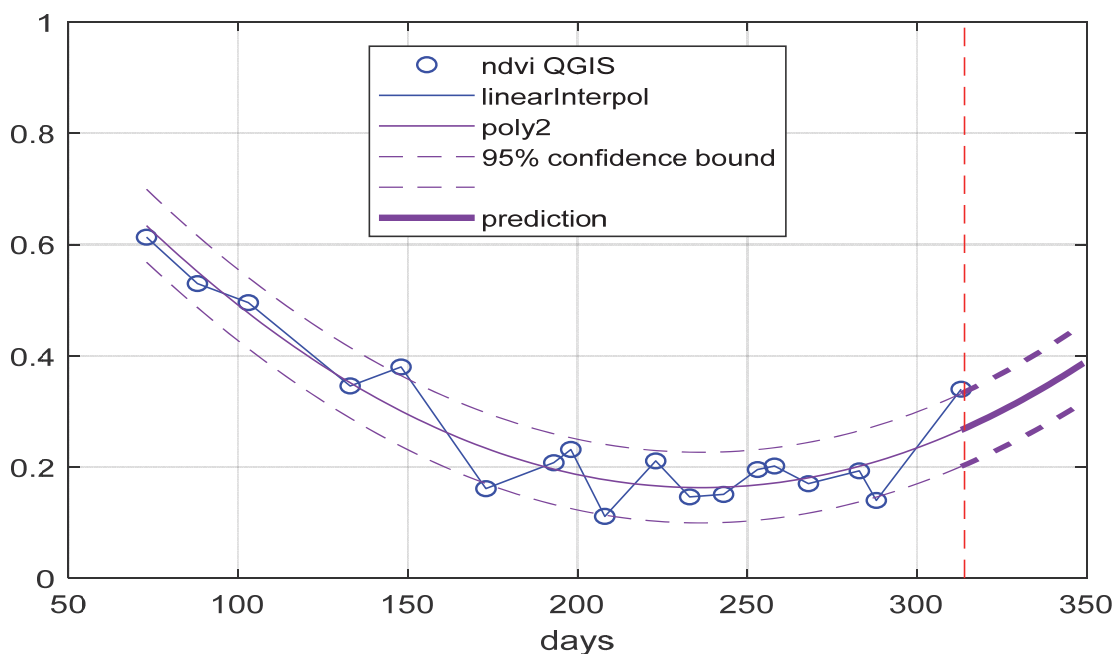


Рисунок 29 – Полиномиальная модель 2-го порядка ряда NDVI, прогноз и 95% доверительные границы

Из представленного графика мы видим, что в прогнозе на 30 дней значения NDVI будет на уровне 0,38-0,42.

Уравнение полиномиальной модели 2-го порядка ряда NDVI имеет вид:

$$ffunX1(x) = p1*x^2 + p2*x + p3,$$

коэффициенты которой (с 95% доверительными границами) принимают значения:

$$p1 = 0.08731 (0.08021, 0.09442)$$

$$p2 = -0.1077 (-0.114, -0.1013)$$

$$p3 = 0.196 (0.1866, 0.2054)$$

Основные статистические характеристики модели:

|   |        |
|---|--------|
| sse (sum of squares due to error)                         | 0.0975 |
| rsquare (coefficient of determination or R <sup>2</sup> ) | 0.9476 |
| dfе (degree of freedom)                                   | 97     |
| adjrsquare (adjustedR2)                                   | 0.9465 |
| rmse (fit standard error or root mean square error)       | 0.0317 |

Модель является статистически значимой, но, возможно, слишком грубо аппроксимирует исходный временной ряд.

Полиномиальная модель 5-го порядка описывается уравнением

$$ffunX1(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6.$$

Оценка NDVI этой моделью представлена на рисунке 30. Видно, что она более тонко учитывает характер поведения оцениваемого параметра на интервале наблюдения.

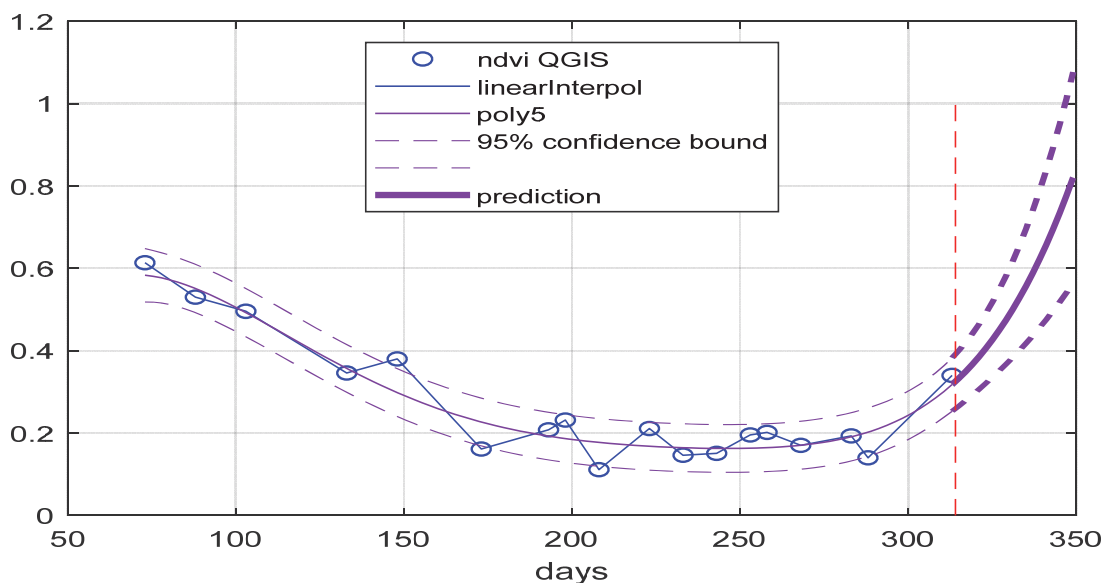


Рисунок 30 – Полиномиальная модель 5-го порядка ряда NDVI, прогноз и 95% доверительные границы

Однако ее прогнозные значения представляются менее реалистичными, кроме того, некоторые параметры модели являются статистически незначимыми.

$$\begin{aligned}
 p1 &= 0.0166 (0.006814, 0.02639) \\
 p2 &= -0.001893 (-0.01036, 0.006574) \\
 p3 &= -0.04404 (-0.07715, -0.01093) \\
 p4 &= 0.09407 (0.07158, 0.1166) \\
 p5 &= -0.09024 (-0.1153, -0.06523) \\
 p6 &= 0.1925 (0.1818, 0.2031)
 \end{aligned}$$

Данная модель не является статистически значимой, а значит, ее параметры в значительной степени определяются случайными ошибками измерений для данной реализации временного ряда и в меньшей степени соответствуют модельной функции.

В качестве компромисса между точностью аппроксимации и статистической значимостью модели может быть использована модель 3-го порядка, уравнение которой имеет вид

$$ffunX1(x) = p1*x^3 + p2*x^2 + p3*x + p4,$$

а оценка NDVI представлена на рисунке 31.

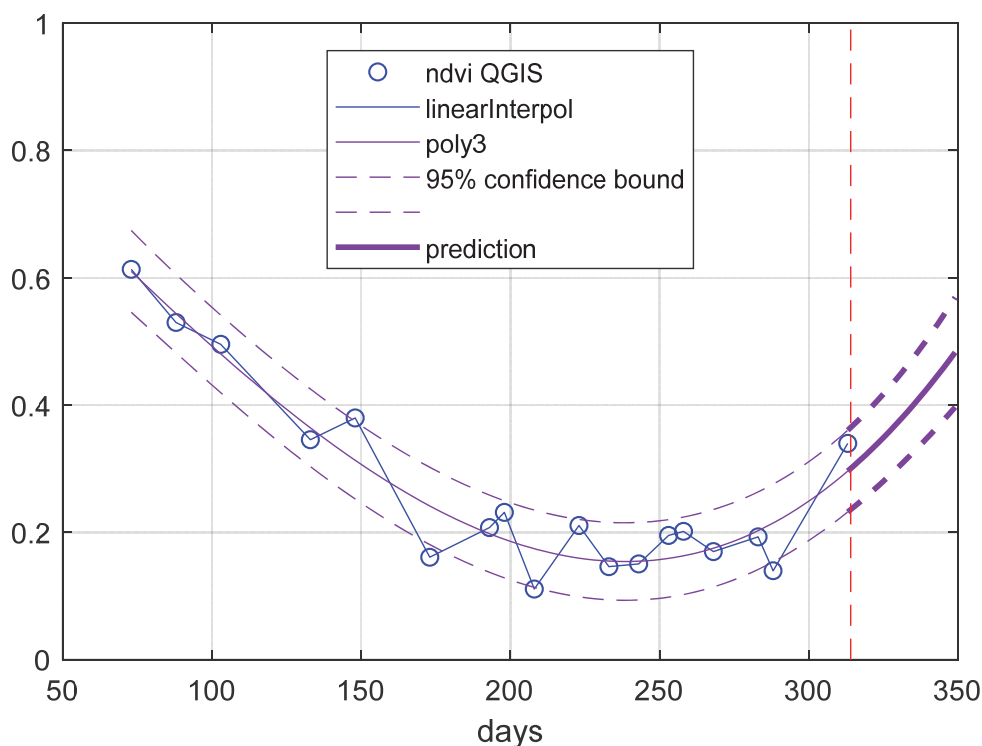


Рисунок 31 – Полиномиальная модель 3-го порядка ряда NDVI, прогноз и 95% доверительные границы

Коэффициенты модели с 95% доверительными границами принимают значения:

$$\begin{aligned} p1 &= 0.01295 (0.005202, 0.0207) \\ p2 &= 0.08767 (0.0809, 0.09444) \\ p3 &= -0.1297 (-0.1447, -0.1146) \\ p4 &= 0.198 (0.189, 0.207) \end{aligned}$$

Основные статистические характеристики модели 3-го порядка:

|   |        |
|---|--------|
| sse (sum of squares due to error)                         | 0.0876 |
| rsquare (coefficient of determination or R <sup>2</sup> ) | 0.9529 |
| dfe (degree of freedom)                                   | 96     |
| adjrsquare (adjustedR2)                                   | 0.9514 |
| rmse (fit standard error or root mean square error)       | 0.0302 |

Модель является статистически значимой и достаточно адекватно аппроксимирует наблюдаемый временной ряд. Значит, ее можно использовать для оценки прогнозных значений результативных признаков пастбищ, в частности биомассы, на основе рассмотренной выше модели множественной регрессии. Так же прогноз подтверждается многолетними исследованиями данного показателя полученные контактными методами.

На следующем рисунке представлены результаты прогнозного моделирования как факторных – NDVI и cumsum NDVI, так и результативного – биомасса, признаков (рис. 32).  $ci\_down$  и  $ci\_up$  – нижняя и верхняя доверительные границы (confidence bounds).

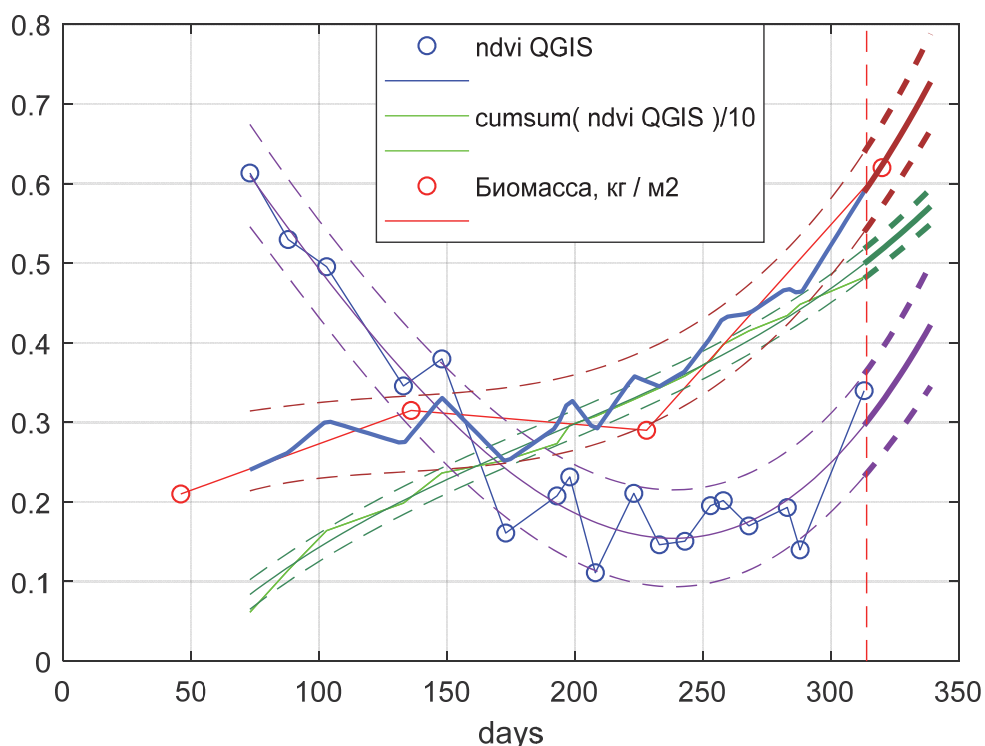


Рисунок 32 – Результаты прогнозного моделирования Биомассы

Для результативного признака – биомассы ( $Y_{estim}$ ),  $кг/м^2$  результаты моделирования представлены также в табличном виде (приложение ж).

При составлении прогностических моделей стоит иметь ввиду, что чем длиннее временные ряды, тем ниже будет достоверность полученных данных. В нашем случае, на представленной модели отображен прогноз на 30 дней. Данный прогноз показывает, что возможная биологическая продуктивность пастбищного травостоя с  $1 м^2$  при вегетационном индексе 0,48 составляет 0,590 кг.

Таким образом, применения дистанционный метод мониторинга оценки пастбищного травостоя и прогностические модели в технологии ускоренного пастбищного животноводства, позволяет одновременно проводить оценку больших пастбищных участков размерами несколько тысяч гектаров и составлять технологическую карту выпаса животных.

## Список использованной литературы

1. Барталев С. А. Автоматизированные методы обработки аэрокосмической информации при оценке состояния пастбищных угодий пустынь: автореф. ... канд. тех. наук. М., 1991. 23 с.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2017. 208 с.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. Самара, ИСОИ РАН, 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
4. Блохина С. Ю. Применение дистанционного зондирования в точном земледелии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 5.
5. Буре В. М., Митрофанов Е. П., Митрофанова О. А., Петрушин А. Ф. Выделение однородных зон сельскохозяйственного поля для закладки опытов с помощью беспилотного летательного аппарата // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2018. Т. 14. № 2. С. 145–150.
6. ГОСТ 13496.15-2016. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира : Межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2016г. № 1464-ст : дата введения 2018-01-01 / разработан Открытым акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности» (ОАО «ВНИИКП»). – Москва : Стандартиформ, 2016 – V, 16.
7. Дзыбов Д. С. Агростепи. Ставрополь: АГРУС, 2010. 256 с.
8. Ерошенко Ф. В., Барталев С. А., Сторчак И. Г., Плотников Д. Е. Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала // Современные

проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112.

9. Железова С. В., Ананьев А. А., Вьюнов М. В., Березовский Е. В. Мониторинг посевов озимой пшеницы с применением беспилотной аэрофотосъемки и оптического датчика GreenSeeker RT200 // Вестник Оренбургского государственного университета. 2016. № 6. С. 56-61

10. Железова С. В., Березовский Е. В., Аброськин Д. П. Использование прибора GreenSeeker® RT200 для мониторинга посевов озимой пшеницы при разных технологиях возделывания // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 1. С. 56–60.

11. Канаш Е. В., Якушев В. П., Осипов Ю. А., Русаков Д. В., Блохина С. Ю., Кравцова А.В. Оптические характеристики листьев яровой пшеницы при дефиците азота и воды // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2017. № 4. С. 9–12.

12. 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](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/54/u_course.pdf) (дата обращения 12.11.2019).

13. Кулинцев В. В., Годунова Е. И., Желнакова Л.И, Удовыдченко В. И., Петрова Л. Н., Антонов С. А., Андреянов Д. Ю., Черкашин В. Н., Дридигер В. К., Дзыбов Д. С., Кравцов В. В., Ерошенко Ф. В., Куприченков М. Т., Ковтун В. И., Багринцева В. Н., Кузыченко Ю. А., Шустикова Е. П., Хрипунов А. И., Шаповалова Н. Н., Чертов В. Г., Володин А. Б., Комаров Н. М., Лапенко Н. Г., Галушко Н. А., Давидянц Э. С., Чапцев А. Н., Чапцева Т. В., Шлыкова Т. Д., Браткова Л. Г., Чумакова В. В., Ерошенко А. А., Ходжаева Н. А., Федотов А. А. Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2013. 520 с.

14. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных



ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284

15. Лупян Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности (ВЕГА) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.

16. 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.

17. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Жарко В. О., Михайлов В. В., Присянникова О. И. Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 199–208.

18. Работнов Т. А. К методике наблюдения над травянистыми растениями на постоянных площадках // Ботанический журн. 1964. Т. 36. № 6. С. 47–50.

19. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.

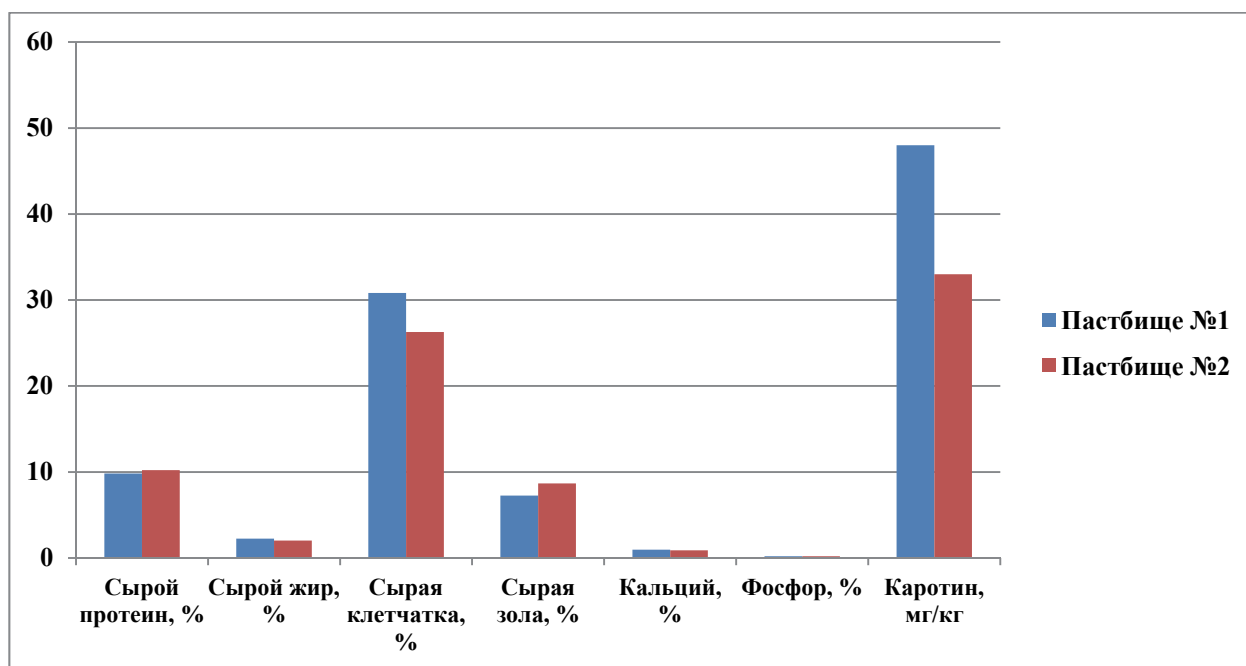
20. Толпин В. А., Лупян Е. А., Барталев С. А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7(306). С. 581–586.

21. Уваров И. А., Бурцев М. А., Толпин В. А., Береза О. В., Тарасова Л. Л., Страшная А. И., Василенко Е. В., Вирченко О. В. Система Вега-Агрометеоролог – основные задачи и возможности // XV Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 13–17 ноября 2017 г. Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 398.

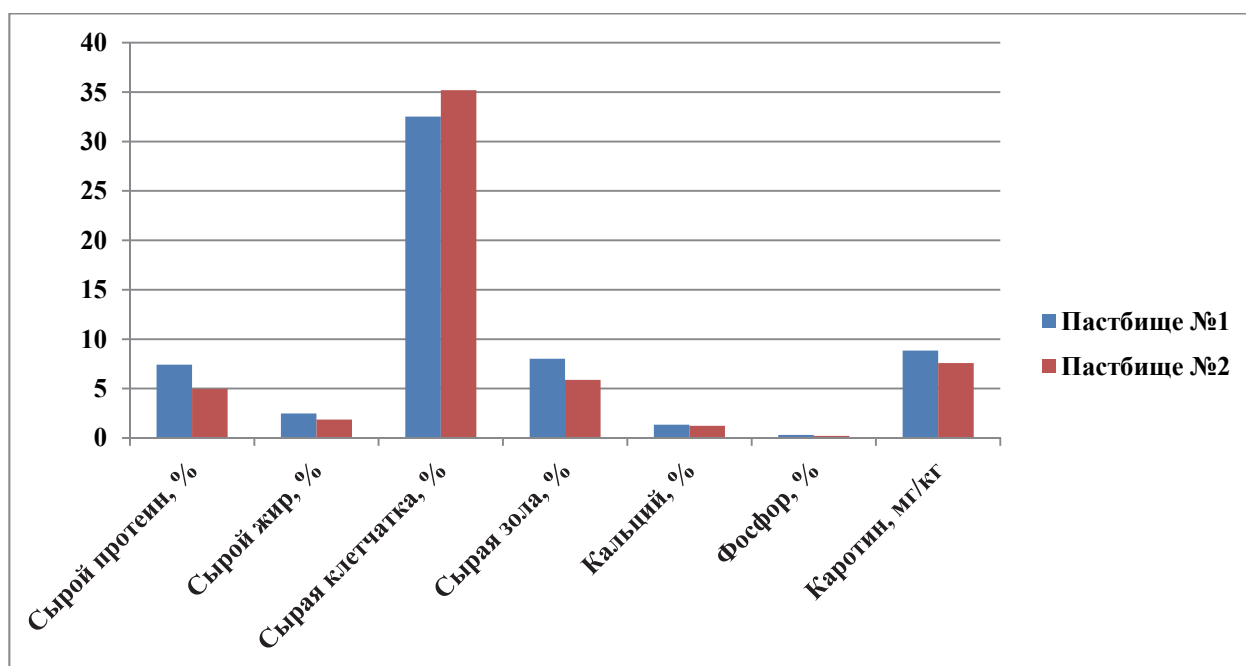
22. Черепанов, А. С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А. С. Черепанов, Е. Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. – №3. – С. 28-32.
23. Шатрова К. В., Маглинец Ю. А., Цибульский Г. М. Модель представления информации о состоянии и динамике земель сельскохозяйственного назначения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2014. Т. 7. № 8. С. 984–989.
24. Шинкаренко С. С. Анализ динамики пастбищных ландшафтов в аридных условиях на основе нормализованного вегетационного индекса (NDVI) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2015. № 1(37). С. 110–114.
25. Якушев В. В. Точное земледелие: теория и практика. СПб.: АФИ, 2016. 364 с.
26. Якушев В. П., Якушев В. В. Перспективы "умного сельского хозяйства" в России // Вестник Российской академии наук. 2018. Т.88. № 9, С. 773–784.
27. Якушев В. П., Якушев В. В., Матвеев Д. А. Роль и задачи точного земледелия в реализации национальной технологической инициативы // Агрофизика. 2017. № 1. С. 51-65.
28. Bernardi, A. C. de S., Grego, C. R., Andrade, R. G., Rabello, L. M., & Inamasu, R. Y. (2017). Spatial variability of vegetation index and soil properties in an integrated crop-livestock system. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(8), 513–518.
29. BOOTH, D. T., S. E. COX, AND R. D. BERRYMAN. 2006. Point sampling digital imagery with 'sample point.' *Environmental Monitoring and Assessment* 123:97–108.
30. De Asis A. M., Omasa K., Oki K., Shimizu Y. Accuracy and applicability of linear spectral unmixing in delineating potential erosion areas in tropical watersheds // *Intern. J. Remote Sensing*. 2008. No. 29(14). pp. 4151–4171.

31. Deering D. W. Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph. D. Diss. Texas A&M University, College Station. 1978. 338 p.
32. Gao Q. Z., Wan Y. F., Xu H. M., Li Y., Jiangcun W. Z., Borjigidai A. Alpine grass-land degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet. China // *Quaternary Intern.* 2010. V. 226(1–2). P. 143–150.
33. Lehnert L. W., Meyer H., Meyer N., Reudenbach Ch., Bendix J. A hyperspectral indicator system for rangeland degradation on the Tibetan Plateau: A case study towards spaceborne monitoring // *Ecological Indicators.* 2014. V. 39. P. 54–64.
34. Meusburger K., Banninger D., Alewell C. Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation.* 2010. V. 12. P. 201–207.
35. Punalekar S. M., Verhoef A., Quaife T. L., Humphries D., Reynolds C. K.. Application of Sentinel-2A data for pasture biomass monitoring using a physically based radiative transfer model *Remote Sensing of Environment* Volume 218 1 December 2018 Pages 207-220
36. Rotz J. D., Abaye A. O., Wynne R. H., Rayburn E. B., Scaglia G., and Phillips R. D. "Classification of Digital Photography for Measuring Productive Ground Cover," *Rangeland Ecology and Management* 61(2), 245-248, (1 March 2008).
37. Tucker C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation // *Remote Sensing of Environment.* 1979. V. 8(2). P. 127–150.

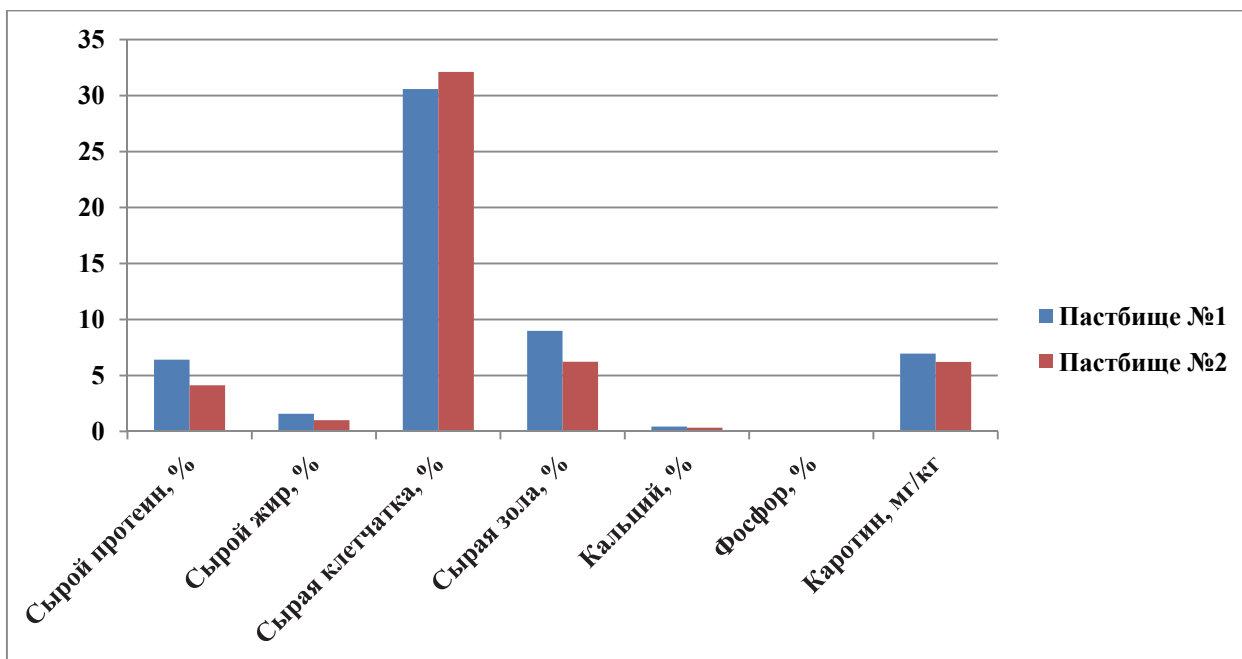
**Химический состав пастбищных кормов, весенний период**



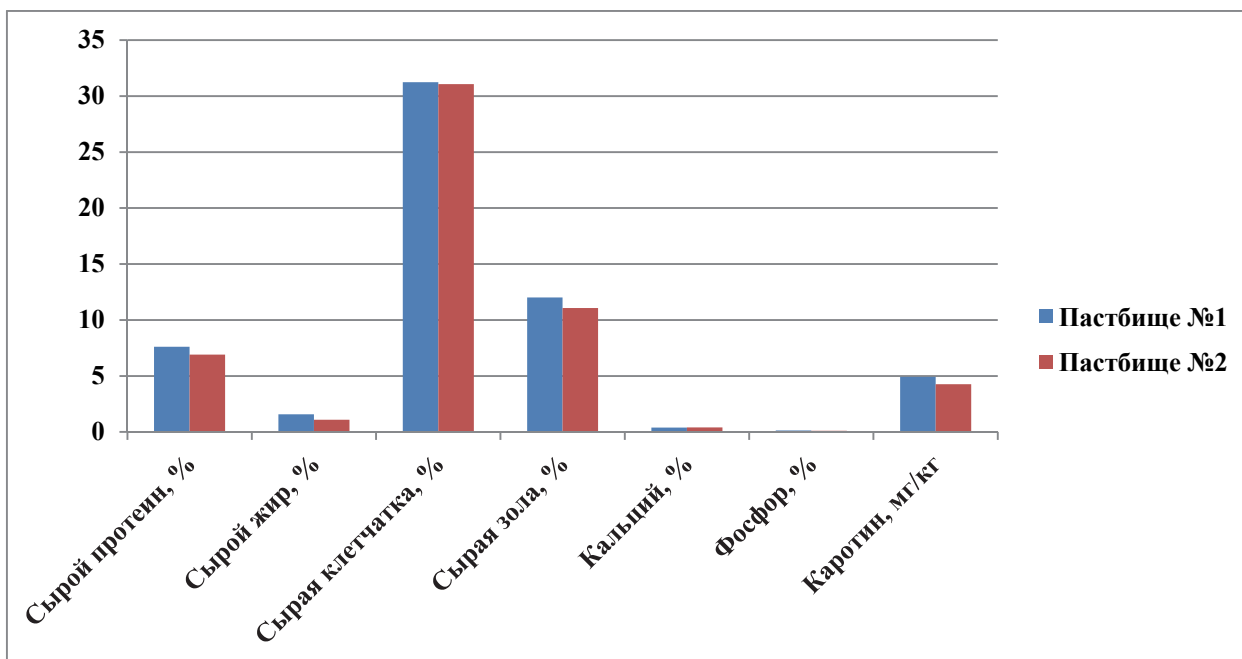
**Химический состав пастбищных кормов, летний период**



**Химический состав пастбищных кормов, осенний период**



**Химический состав пастбищных кормов, осенне-зимний период**



## Факторные признаки, результивный признак

## Биомасса и его оценка

| №  | x1     | x2     | y      | y est  | dy      | dy^2     | abs(dy) |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| 1  | 0,6133 | 0,6133 | 0,2415 | 0,244  | -0,0025 | 6,25E-06 | 0,0025  |
| 2  | 0,6106 | 0,6304 | 0,2421 | 0,2447 | -0,0026 | 6,76E-06 | 0,0026  |
| 3  | 0,6057 | 0,6612 | 0,2431 | 0,2459 | -0,0028 | 7,84E-06 | 0,0028  |
| 4  | 0,5991 | 0,703  | 0,2445 | 0,2475 | -0,003  | 9E-06    | 0,003   |
| 5  | 0,5912 | 0,7535 | 0,2461 | 0,2494 | -0,0033 | 1,09E-05 | 0,0033  |
| 6  | 0,5821 | 0,8111 | 0,248  | 0,2517 | -0,0037 | 1,37E-05 | 0,0037  |
| 7  | 0,5721 | 0,8743 | 0,2501 | 0,2541 | -0,004  | 0,000016 | 0,004   |
| 8  | 0,5628 | 0,941  | 0,2524 | 0,2572 | -0,0048 | 2,3E-05  | 0,0048  |
| 9  | 0,5541 | 1,0105 | 0,2547 | 0,261  | -0,0063 | 3,97E-05 | 0,0063  |
| 10 | 0,5462 | 1,082  | 0,2572 | 0,2654 | -0,0082 | 6,72E-05 | 0,0082  |
| 11 | 0,5387 | 1,1553 | 0,2597 | 0,2702 | -0,0105 | 0,00011  | 0,0105  |
| 12 | 0,5315 | 1,2299 | 0,2623 | 0,2753 | -0,013  | 0,000169 | 0,013   |
| 13 | 0,5247 | 1,3056 | 0,2649 | 0,2807 | -0,0158 | 0,00025  | 0,0158  |
| 14 | 0,5174 | 1,3757 | 0,2676 | 0,2852 | -0,0176 | 0,00031  | 0,0176  |
| 15 | 0,5091 | 1,4373 | 0,2703 | 0,2882 | -0,0179 | 0,00032  | 0,0179  |
| 16 | 0,5    | 1,4922 | 0,273  | 0,2902 | -0,0172 | 0,000296 | 0,0172  |
| 17 | 0,4903 | 1,5417 | 0,2758 | 0,2912 | -0,0154 | 0,000237 | 0,0154  |
| 18 | 0,4802 | 1,5869 | 0,2785 | 0,2914 | -0,0129 | 0,000166 | 0,0129  |
| 19 | 0,4696 | 1,6287 | 0,2813 | 0,2911 | -0,0098 | 9,6E-05  | 0,0098  |
| 20 | 0,4587 | 1,6677 | 0,2841 | 0,2904 | -0,0063 | 3,97E-05 | 0,0063  |
| 21 | 0,4476 | 1,7044 | 0,2869 | 0,2892 | -0,0023 | 5,29E-06 | 0,0023  |
| 22 | 0,4363 | 1,7394 | 0,2897 | 0,2878 | 0,0019  | 3,61E-06 | 0,0019  |
| 23 | 0,4249 | 1,773  | 0,2925 | 0,2861 | 0,0064  | 4,1E-05  | 0,0064  |
| 24 | 0,4133 | 1,8055 | 0,2953 | 0,2842 | 0,0111  | 0,000123 | 0,0111  |
| 25 | 0,4016 | 1,837  | 0,2981 | 0,2822 | 0,0159  | 0,000253 | 0,0159  |
| 26 | 0,3907 | 1,8695 | 0,3009 | 0,2807 | 0,0202  | 0,000408 | 0,0202  |
| 27 | 0,3831 | 1,9078 | 0,3037 | 0,2814 | 0,0223  | 0,000497 | 0,0223  |
| 28 | 0,3781 | 1,9507 | 0,3059 | 0,2839 | 0,022   | 0,000484 | 0,022   |
| 29 | 0,3752 | 1,9973 | 0,3074 | 0,2879 | 0,0195  | 0,00038  | 0,0195  |
| 30 | 0,374  | 2,0469 | 0,3085 | 0,2929 | 0,0156  | 0,000243 | 0,0156  |
| 31 | 0,3741 | 2,0988 | 0,3093 | 0,299  | 0,0103  | 0,000106 | 0,0103  |
| 32 | 0,375  | 2,152  | 0,3098 | 0,3055 | 0,0043  | 1,85E-05 | 0,0043  |
| 33 | 0,3714 | 2,1977 | 0,31   | 0,309  | 0,001   | 0,000001 | 0,001   |
| 34 | 0,3643 | 2,2374 | 0,3101 | 0,3101 | 0       | 0        | 0       |
| 35 | 0,3544 | 2,2723 | 0,31   | 0,3094 | 0,0006  | 3,6E-07  | 0,0006  |
| 36 | 0,3422 | 2,3033 | 0,3098 | 0,3071 | 0,0027  | 7,29E-06 | 0,0027  |
| 37 | 0,3283 | 2,3312 | 0,3095 | 0,3035 | 0,006   | 3,6E-05  | 0,006   |

| <b>№</b> | <b>x1</b> | <b>x2</b> | <b>y</b> | <b>y est</b> | <b>dy</b> | <b>dy^2</b> | <b>abs(dy)</b> |
|----------|-----------|-----------|----------|--------------|-----------|-------------|----------------|
| 38       | 0,3128    | 2,3567    | 0,3092   | 0,299        | 0,0102    | 0,000104    | 0,0102         |
| 39       | 0,2963    | 2,3802    | 0,3088   | 0,2937       | 0,0151    | 0,000228    | 0,0151         |
| 40       | 0,2787    | 2,4021    | 0,3083   | 0,2878       | 0,0205    | 0,00042     | 0,0205         |
| 41       | 0,2605    | 2,4228    | 0,3078   | 0,2813       | 0,0265    | 0,000702    | 0,0265         |
| 42       | 0,2416    | 2,4424    | 0,3073   | 0,2745       | 0,0328    | 0,001076    | 0,0328         |
| 43       | 0,2264    | 2,4627    | 0,3067   | 0,2694       | 0,0373    | 0,001391    | 0,0373         |
| 44       | 0,2153    | 2,484     | 0,3061   | 0,2665       | 0,0396    | 0,001568    | 0,0396         |
| 45       | 0,2075    | 2,506     | 0,3055   | 0,2653       | 0,0402    | 0,001616    | 0,0402         |
| 46       | 0,2024    | 2,5287    | 0,3049   | 0,2654       | 0,0395    | 0,00156     | 0,0395         |
| 47       | 0,1995    | 2,5518    | 0,3043   | 0,2667       | 0,0376    | 0,001414    | 0,0376         |
| 48       | 0,1983    | 2,5754    | 0,3037   | 0,2688       | 0,0349    | 0,001218    | 0,0349         |
| 49       | 0,1985    | 2,5993    | 0,303    | 0,2716       | 0,0314    | 0,000986    | 0,0314         |
| 50       | 0,1997    | 2,6234    | 0,3024   | 0,275        | 0,0274    | 0,000751    | 0,0274         |
| 51       | 0,2024    | 2,6564    | 0,3018   | 0,2801       | 0,0217    | 0,000471    | 0,0217         |
| 52       | 0,2069    | 2,7053    | 0,3011   | 0,2879       | 0,0132    | 0,000174    | 0,0132         |
| 53       | 0,2093    | 2,7594    | 0,3005   | 0,2952       | 0,0053    | 2,81E-05    | 0,0053         |
| 54       | 0,2053    | 2,808     | 0,2998   | 0,2989       | 0,0009    | 8,1E-07     | 0,0009         |
| 55       | 0,1963    | 2,8523    | 0,2992   | 0,2996       | -0,0004   | 1,6E-07     | 0,0004         |
| 56       | 0,1833    | 2,8932    | 0,2985   | 0,298        | 0,0005    | 2,5E-07     | 0,0005         |
| 57       | 0,1699    | 2,9317    | 0,2978   | 0,2959       | 0,0019    | 3,61E-06    | 0,0019         |
| 58       | 0,1623    | 2,9693    | 0,2972   | 0,2966       | 0,0006    | 3,6E-07     | 0,0006         |
| 59       | 0,1595    | 3,0062    | 0,2965   | 0,2995       | -0,003    | 9E-06       | 0,003          |
| 60       | 0,1605    | 3,0425    | 0,2959   | 0,3042       | -0,0083   | 6,89E-05    | 0,0083         |
| 61       | 0,1645    | 3,0784    | 0,2952   | 0,3102       | -0,015    | 0,000225    | 0,015          |
| 62       | 0,171     | 3,1139    | 0,2946   | 0,3174       | -0,0228   | 0,00052     | 0,0228         |
| 63       | 0,1786    | 3,1492    | 0,2939   | 0,3251       | -0,0312   | 0,000973    | 0,0312         |
| 64       | 0,1815    | 3,1845    | 0,2932   | 0,3305       | -0,0373   | 0,001391    | 0,0373         |
| 65       | 0,1807    | 3,2198    | 0,2927   | 0,3342       | -0,0415   | 0,001722    | 0,0415         |
| 66       | 0,1769    | 3,2552    | 0,294    | 0,3364       | -0,0424   | 0,001798    | 0,0424         |
| 67       | 0,1708    | 3,2905    | 0,2968   | 0,3375       | -0,0407   | 0,001656    | 0,0407         |
| 68       | 0,166     | 3,3261    | 0,3008   | 0,3393       | -0,0385   | 0,001482    | 0,0385         |
| 69       | 0,1625    | 3,3619    | 0,3057   | 0,3417       | -0,036    | 0,001296    | 0,036          |
| 70       | 0,1599    | 3,3978    | 0,3113   | 0,3446       | -0,0333   | 0,001109    | 0,0333         |
| 71       | 0,158     | 3,4339    | 0,3176   | 0,3478       | -0,0302   | 0,000912    | 0,0302         |
| 72       | 0,1584    | 3,4719    | 0,3244   | 0,3524       | -0,028    | 0,000784    | 0,028          |
| 73       | 0,1609    | 3,5118    | 0,3315   | 0,3581       | -0,0266   | 0,000708    | 0,0266         |
| 74       | 0,1651    | 3,5532    | 0,339    | 0,3649       | -0,0259   | 0,000671    | 0,0259         |
| 75       | 0,1706    | 3,5957    | 0,3467   | 0,3724       | -0,0257   | 0,00066     | 0,0257         |
| 76       | 0,176     | 3,6468    | 0,3546   | 0,3809       | -0,0263   | 0,000692    | 0,0263         |
| 77       | 0,1809    | 3,7073    | 0,3626   | 0,3902       | -0,0276   | 0,000762    | 0,0276         |
| 78       | 0,184     | 3,7674    | 0,3708   | 0,3986       | -0,0278   | 0,000773    | 0,0278         |
| 79       | 0,1849    | 3,8237    | 0,3791   | 0,4055       | -0,0264   | 0,000697    | 0,0264         |

| <b>№</b> | <b>x1</b> | <b>x2</b> | <b>y</b> | <b>y est</b> | <b>dy</b> | <b>dy^2</b> | <b>abs(dy)</b> |
|----------|-----------|-----------|----------|--------------|-----------|-------------|----------------|
| 80       | 0,1841    | 3,877     | 0,3875   | 0,4112       | -0,0237   | 0,000562    | 0,0237         |
| 81       | 0,182     | 3,9279    | 0,3959   | 0,416        | -0,0201   | 0,000404    | 0,0201         |
| 82       | 0,18      | 3,9757    | 0,4044   | 0,4205       | -0,0161   | 0,000259    | 0,0161         |
| 83       | 0,1791    | 4,0202    | 0,4129   | 0,4252       | -0,0123   | 0,000151    | 0,0123         |
| 84       | 0,1792    | 4,062     | 0,4215   | 0,43         | -0,0085   | 7,23E-05    | 0,0085         |
| 85       | 0,18      | 4,1017    | 0,4301   | 0,435        | -0,0049   | 2,4E-05     | 0,0049         |
| 86       | 0,1814    | 4,1397    | 0,4387   | 0,44         | -0,0013   | 1,69E-06    | 0,0013         |
| 87       | 0,1832    | 4,1764    | 0,4473   | 0,4451       | 0,0022    | 4,84E-06    | 0,0022         |
| 88       | 0,1833    | 4,2147    | 0,456    | 0,4495       | 0,0065    | 4,23E-05    | 0,0065         |
| 89       | 0,1781    | 4,2588    | 0,4646   | 0,4521       | 0,0125    | 0,000156    | 0,0125         |
| 90       | 0,1717    | 4,3056    | 0,4733   | 0,4543       | 0,019     | 0,000361    | 0,019          |
| 91       | 0,1704    | 4,3496    | 0,482    | 0,4588       | 0,0232    | 0,000538    | 0,0232         |
| 92       | 0,1732    | 4,3913    | 0,4906   | 0,4649       | 0,0257    | 0,00066     | 0,0257         |
| 93       | 0,1794    | 4,4313    | 0,4993   | 0,4725       | 0,0268    | 0,000718    | 0,0268         |
| 94       | 0,1882    | 4,4699    | 0,508    | 0,4812       | 0,0268    | 0,000718    | 0,0268         |
| 95       | 0,1991    | 4,5074    | 0,5167   | 0,4907       | 0,026     | 0,000676    | 0,026          |
| 96       | 0,2118    | 4,544     | 0,5254   | 0,501        | 0,0244    | 0,000595    | 0,0244         |
| 97       | 0,2257    | 4,5798    | 0,5341   | 0,5119       | 0,0222    | 0,000493    | 0,0222         |
| 98       | 0,2408    | 4,6151    | 0,5427   | 0,5232       | 0,0195    | 0,00038     | 0,0195         |
| 99       | 0,2567    | 4,6499    | 0,5514   | 0,5348       | 0,0166    | 0,000276    | 0,0166         |
| 100      | 0,2733    | 4,6843    | 0,5601   | 0,5468       | 0,0133    | 0,000177    | 0,0133         |
|          |           |           |          |              |           | RMSE        | 0,021466       |



## Приложение Е

### Факторные признаки, результативный признак

#### Питательная ценность и его оценка

| №  | x1     | x2     | y      | y <sub>est</sub> | dy      | dy <sup>2</sup> | abs(dy) |
|----|--------|--------|--------|------------------|---------|-----------------|---------|
| 1  | 0,6133 | 0,6133 | 0,855  | 0,8524           | 0,0026  | 6,76E-06        | 0,0026  |
| 2  | 0,6106 | 0,6304 | 0,8547 | 0,8521           | 0,0026  | 6,76E-06        | 0,0026  |
| 3  | 0,6057 | 0,6612 | 0,8542 | 0,8516           | 0,0026  | 6,76E-06        | 0,0026  |
| 4  | 0,5991 | 0,703  | 0,8536 | 0,8509           | 0,0027  | 7,29E-06        | 0,0027  |
| 5  | 0,5912 | 0,7535 | 0,8528 | 0,85             | 0,0028  | 7,84E-06        | 0,0028  |
| 6  | 0,5821 | 0,8111 | 0,8519 | 0,849            | 0,0029  | 8,41E-06        | 0,0029  |
| 7  | 0,5721 | 0,8743 | 0,8509 | 0,848            | 0,0029  | 8,41E-06        | 0,0029  |
| 8  | 0,5628 | 0,941  | 0,8498 | 0,8469           | 0,0029  | 8,41E-06        | 0,0029  |
| 9  | 0,5541 | 1,0105 | 0,8487 | 0,8457           | 0,003   | 9E-06           | 0,003   |
| 10 | 0,5462 | 1,082  | 0,8475 | 0,8446           | 0,0029  | 8,41E-06        | 0,0029  |
| 11 | 0,5387 | 1,1553 | 0,8463 | 0,8434           | 0,0029  | 8,41E-06        | 0,0029  |
| 12 | 0,5315 | 1,2299 | 0,8451 | 0,8423           | 0,0028  | 7,84E-06        | 0,0028  |
| 13 | 0,5247 | 1,3056 | 0,8439 | 0,8411           | 0,0028  | 7,84E-06        | 0,0028  |
| 14 | 0,5174 | 1,3757 | 0,8426 | 0,84             | 0,0026  | 6,76E-06        | 0,0026  |
| 15 | 0,5091 | 1,4373 | 0,8413 | 0,839            | 0,0023  | 5,29E-06        | 0,0023  |
| 16 | 0,5    | 1,4922 | 0,84   | 0,8381           | 0,0019  | 3,61E-06        | 0,0019  |
| 17 | 0,4903 | 1,5417 | 0,8387 | 0,8372           | 0,0015  | 2,25E-06        | 0,0015  |
| 18 | 0,4802 | 1,5869 | 0,8374 | 0,8364           | 0,001   | 0,000001        | 0,001   |
| 19 | 0,4696 | 1,6287 | 0,836  | 0,8356           | 0,0004  | 1,6E-07         | 0,0004  |
| 20 | 0,4587 | 1,6677 | 0,8347 | 0,8348           | -1E-04  | 1E-08           | 1E-04   |
| 21 | 0,4476 | 1,7044 | 0,8334 | 0,8341           | -0,0007 | 4,9E-07         | 0,0007  |
| 22 | 0,4363 | 1,7394 | 0,8321 | 0,8334           | -0,0013 | 1,69E-06        | 0,0013  |
| 23 | 0,4249 | 1,773  | 0,8307 | 0,8327           | -0,002  | 4E-06           | 0,002   |
| 24 | 0,4133 | 1,8055 | 0,8294 | 0,832            | -0,0026 | 6,76E-06        | 0,0026  |
| 25 | 0,4016 | 1,837  | 0,828  | 0,8314           | -0,0034 | 1,16E-05        | 0,0034  |
| 26 | 0,3907 | 1,8695 | 0,8267 | 0,8307           | -0,004  | 0,000016        | 0,004   |
| 27 | 0,3831 | 1,9078 | 0,8254 | 0,83             | -0,0046 | 2,12E-05        | 0,0046  |
| 28 | 0,3781 | 1,9507 | 0,8242 | 0,8294           | -0,0052 | 2,7E-05         | 0,0052  |
| 29 | 0,3752 | 1,9973 | 0,8233 | 0,8287           | -0,0054 | 2,92E-05        | 0,0054  |
| 30 | 0,374  | 2,0469 | 0,8225 | 0,828            | -0,0055 | 3,02E-05        | 0,0055  |
| 31 | 0,3741 | 2,0988 | 0,8218 | 0,8272           | -0,0054 | 2,92E-05        | 0,0054  |
| 32 | 0,375  | 2,152  | 0,8211 | 0,8265           | -0,0054 | 2,92E-05        | 0,0054  |
| 33 | 0,3714 | 2,1977 | 0,8206 | 0,8258           | -0,0052 | 2,7E-05         | 0,0052  |
| 34 | 0,3643 | 2,2374 | 0,8201 | 0,8251           | -0,005  | 2,5E-05         | 0,005   |
| 35 | 0,3544 | 2,2723 | 0,8197 | 0,8245           | -0,0048 | 2,3E-05         | 0,0048  |
| 36 | 0,3422 | 2,3033 | 0,8193 | 0,8238           | -0,0045 | 2,02E-05        | 0,0045  |
| 37 | 0,3283 | 2,3312 | 0,8189 | 0,8231           | -0,0042 | 1,76E-05        | 0,0042  |

| №  | x1     | x2     | y      | y_est  | dy      | dy^2     | abs(dy) |
|----|--------|--------|--------|--------|---------|----------|---------|
| 38 | 0,3128 | 2,3567 | 0,8185 | 0,8225 | -0,004  | 0,000016 | 0,004   |
| 39 | 0,2963 | 2,3802 | 0,8182 | 0,8218 | -0,0036 | 1,3E-05  | 0,0036  |
| 40 | 0,2787 | 2,4021 | 0,8179 | 0,8212 | -0,0033 | 1,09E-05 | 0,0033  |
| 41 | 0,2605 | 2,4228 | 0,8176 | 0,8206 | -0,003  | 9E-06    | 0,003   |
| 42 | 0,2416 | 2,4424 | 0,8172 | 0,8199 | -0,0027 | 7,29E-06 | 0,0027  |
| 43 | 0,2264 | 2,4627 | 0,817  | 0,8193 | -0,0023 | 5,29E-06 | 0,0023  |
| 44 | 0,2153 | 2,484  | 0,8167 | 0,8188 | -0,0021 | 4,41E-06 | 0,0021  |
| 45 | 0,2075 | 2,506  | 0,8164 | 0,8184 | -0,002  | 4E-06    | 0,002   |
| 46 | 0,2024 | 2,5287 | 0,8161 | 0,818  | -0,0019 | 3,61E-06 | 0,0019  |
| 47 | 0,1995 | 2,5518 | 0,8158 | 0,8176 | -0,0018 | 3,24E-06 | 0,0018  |
| 48 | 0,1983 | 2,5754 | 0,8156 | 0,8172 | -0,0016 | 2,56E-06 | 0,0016  |
| 49 | 0,1985 | 2,5993 | 0,8153 | 0,8169 | -0,0016 | 2,56E-06 | 0,0016  |
| 50 | 0,1997 | 2,6234 | 0,815  | 0,8166 | -0,0016 | 2,56E-06 | 0,0016  |
| 51 | 0,2024 | 2,6564 | 0,8147 | 0,8162 | -0,0015 | 2,25E-06 | 0,0015  |
| 52 | 0,2069 | 2,7053 | 0,8145 | 0,8156 | -0,0011 | 1,21E-06 | 0,0011  |
| 53 | 0,2093 | 2,7594 | 0,8142 | 0,8149 | -0,0007 | 4,9E-07  | 0,0007  |
| 54 | 0,2053 | 2,808  | 0,8139 | 0,8142 | -0,0003 | 9E-08    | 0,0003  |
| 55 | 0,1963 | 2,8523 | 0,8137 | 0,8134 | 0,0003  | 9E-08    | 0,0003  |
| 56 | 0,1833 | 2,8932 | 0,8134 | 0,8126 | 0,0008  | 6,4E-07  | 0,0008  |
| 57 | 0,1699 | 2,9317 | 0,8132 | 0,8118 | 0,0014  | 1,96E-06 | 0,0014  |
| 58 | 0,1623 | 2,9693 | 0,8129 | 0,8111 | 0,0018  | 3,24E-06 | 0,0018  |
| 59 | 0,1595 | 3,0062 | 0,8126 | 0,8106 | 0,002   | 4E-06    | 0,002   |
| 60 | 0,1605 | 3,0425 | 0,8124 | 0,8101 | 0,0023  | 5,29E-06 | 0,0023  |
| 61 | 0,1645 | 3,0784 | 0,8121 | 0,8097 | 0,0024  | 5,76E-06 | 0,0024  |
| 62 | 0,171  | 3,1139 | 0,8118 | 0,8093 | 0,0025  | 6,25E-06 | 0,0025  |
| 63 | 0,1786 | 3,1492 | 0,8116 | 0,809  | 0,0026  | 6,76E-06 | 0,0026  |
| 64 | 0,1815 | 3,1845 | 0,8113 | 0,8085 | 0,0028  | 7,84E-06 | 0,0028  |
| 65 | 0,1807 | 3,2198 | 0,811  | 0,808  | 0,003   | 9E-06    | 0,003   |
| 66 | 0,1769 | 3,2552 | 0,8107 | 0,8075 | 0,0032  | 1,02E-05 | 0,0032  |
| 67 | 0,1708 | 3,2905 | 0,8102 | 0,8069 | 0,0033  | 1,09E-05 | 0,0033  |
| 68 | 0,166  | 3,3261 | 0,8097 | 0,8063 | 0,0034  | 1,16E-05 | 0,0034  |
| 69 | 0,1625 | 3,3619 | 0,8091 | 0,8057 | 0,0034  | 1,16E-05 | 0,0034  |
| 70 | 0,1599 | 3,3978 | 0,8085 | 0,8052 | 0,0033  | 1,09E-05 | 0,0033  |
| 71 | 0,158  | 3,4339 | 0,8078 | 0,8046 | 0,0032  | 1,02E-05 | 0,0032  |
| 72 | 0,1584 | 3,4719 | 0,8071 | 0,8041 | 0,003   | 9E-06    | 0,003   |
| 73 | 0,1609 | 3,5118 | 0,8064 | 0,8036 | 0,0028  | 7,84E-06 | 0,0028  |
| 74 | 0,1651 | 3,5532 | 0,8057 | 0,8031 | 0,0026  | 6,76E-06 | 0,0026  |
| 75 | 0,1706 | 3,5957 | 0,805  | 0,8027 | 0,0023  | 5,29E-06 | 0,0023  |
| 76 | 0,176  | 3,6468 | 0,8042 | 0,8021 | 0,0021  | 4,41E-06 | 0,0021  |
| 77 | 0,1809 | 3,7073 | 0,8035 | 0,8013 | 0,0022  | 4,84E-06 | 0,0022  |
| 78 | 0,184  | 3,7674 | 0,8027 | 0,8006 | 0,0021  | 4,41E-06 | 0,0021  |
| 79 | 0,1849 | 3,8237 | 0,802  | 0,7998 | 0,0022  | 4,84E-06 | 0,0022  |

| №   | x1     | x2     | y      | y_est  | dy      | dy^2     | abs(dy)  |
|-----|--------|--------|--------|--------|---------|----------|----------|
| 80  | 0,1841 | 3,877  | 0,8012 | 0,799  | 0,0022  | 4,84E-06 | 0,0022   |
| 81  | 0,182  | 3,9279 | 0,8004 | 0,7983 | 0,0021  | 4,41E-06 | 0,0021   |
| 82  | 0,18   | 3,9757 | 0,7996 | 0,7976 | 0,002   | 4E-06    | 0,002    |
| 83  | 0,1791 | 4,0202 | 0,7988 | 0,797  | 0,0018  | 3,24E-06 | 0,0018   |
| 84  | 0,1792 | 4,062  | 0,7981 | 0,7964 | 0,0017  | 2,89E-06 | 0,0017   |
| 85  | 0,18   | 4,1017 | 0,7973 | 0,7959 | 0,0014  | 1,96E-06 | 0,0014   |
| 86  | 0,1814 | 4,1397 | 0,7965 | 0,7954 | 0,0011  | 1,21E-06 | 0,0011   |
| 87  | 0,1832 | 4,1764 | 0,7957 | 0,7949 | 0,0008  | 6,4E-07  | 0,0008   |
| 88  | 0,1833 | 4,2147 | 0,7949 | 0,7944 | 0,0005  | 2,5E-07  | 0,0005   |
| 89  | 0,1781 | 4,2588 | 0,7941 | 0,7937 | 0,0004  | 1,6E-07  | 0,0004   |
| 90  | 0,1717 | 4,3056 | 0,7933 | 0,7929 | 0,0004  | 1,6E-07  | 0,0004   |
| 91  | 0,1704 | 4,3496 | 0,7926 | 0,7923 | 0,0003  | 9E-08    | 0,0003   |
| 92  | 0,1732 | 4,3913 | 0,7918 | 0,7918 | 0       | 0        | 0        |
| 93  | 0,1794 | 4,4313 | 0,791  | 0,7913 | -0,0003 | 9E-08    | 0,0003   |
| 94  | 0,1882 | 4,4699 | 0,7902 | 0,791  | -0,0008 | 6,4E-07  | 0,0008   |
| 95  | 0,1991 | 4,5074 | 0,7894 | 0,7907 | -0,0013 | 1,69E-06 | 0,0013   |
| 96  | 0,2118 | 4,544  | 0,7886 | 0,7904 | -0,0018 | 3,24E-06 | 0,0018   |
| 97  | 0,2257 | 4,5798 | 0,7878 | 0,7902 | -0,0024 | 5,76E-06 | 0,0024   |
| 98  | 0,2408 | 4,6151 | 0,787  | 0,79   | -0,003  | 9E-06    | 0,003    |
| 99  | 0,2567 | 4,6499 | 0,7862 | 0,7898 | -0,0036 | 1,3E-05  | 0,0036   |
| 100 | 0,2733 | 4,6843 | 0,7854 | 0,7897 | -0,0043 | 1,85E-05 | 0        |
|     |        |        |        |        |         | RMSE     | 0,002814 |

Приложение Ж

### Данные для моделирования биомассы

| День | Дата        | Y_estm  | ci_doun | ci_up   |
|------|-------------|---------|---------|---------|
| 313  | 08-Nov-2020 | 0.58929 | 0.53914 | 0.63943 |
| 315  | 10-Nov-2020 | 0.5987  | 0.54813 | 0.64927 |
| 317  | 12-Nov-2020 | 0.60831 | 0.55727 | 0.65935 |
| 319  | 14-Nov-2020 | 0.61812 | 0.56655 | 0.66969 |
| 321  | 16-Nov-2020 | 0.62814 | 0.57599 | 0.68028 |
| 323  | 18-Nov-2020 | 0.63836 | 0.58558 | 0.69113 |
| 325  | 20-Nov-2020 | 0.64879 | 0.59532 | 0.70225 |
| 327  | 22-Nov-2020 | 0.65943 | 0.60521 | 0.71365 |
| 329  | 24-Nov-2020 | 0.67028 | 0.61524 | 0.72532 |
| 331  | 26-Nov-2020 | 0.68135 | 0.62542 | 0.73727 |
| 333  | 28-Nov-2020 | 0.69263 | 0.63575 | 0.74951 |
| 335  | 30-Nov-2020 | 0.70413 | 0.64623 | 0.76204 |
| 337  | 02-Dec-2020 | 0.71586 | 0.65685 | 0.77486 |
| 339  | 04-Dec-2020 | 0.7278  | 0.66762 | 0.78798 |

*Учебное издание*

**Трухачев** Владимир Иванович  
**Олейник** Сергей Александрович  
**Лесняк** Татьяна Сергеевна  
**Литвин** Дмитрий Борисович

**ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ  
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА  
И ЗОНДИРОВАНИЯ В ПАСТБИЩНОМ  
ЖИВОТНОВОДСТВЕ**

*Методические рекомендации*

*Публикуется в авторской редакции*

---

Подписано в печать 25.12.2020.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л. 4,42. Тираж 100 экз. Заказ № 319.

Издательство Ставропольского государственного аграрного университета «АГРУС»,  
355017, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12. Тел./факс (8652) 35-06-94.

E-mail: [agrus2007@mail.ru](mailto:agrus2007@mail.ru)

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