

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Воронежский государственный аграрный университет имени императора  
Петра I»

*На правах рукописи*



**Куликов Юрий Алексеевич**

**МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ  
БИОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ  
ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

Специальность 1.5.20 – Биологические ресурсы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата сельскохозяйственных наук

Научный руководитель:  
доктор биологических наук,  
доцент Высоцкая Елена Анатольевна

Воронеж 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА ХОЗЯЙСТВЕННО-ЦЕННЫХ ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ.....	12
1.1. Разнообразие и биоресурсный потенциал хозяйственно-ценных видов растительных организмов луговых территорий.....	12
1.2. Методологические основы изучения динамики состояния растительных организмов хозяйственно-ценных луговых биоценозов.....	20
2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	32
2.1 Объекты исследования.....	32
2.2 Характеристика почвенно-климатических условий.....	33
2.3 Геоморфология биоценозов.....	37
2.4 Растительный потенциал территорий.....	41
2.5 Методы мониторинга пространственно-временной дифференциации угодий луговых фитоценозов.....	43
2.5.1 Методы мониторинга и учета состояния.....	43
2.5.2 Методы анализа результатов мониторинга.....	47
3. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННО-ЦЕННЫХ ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ.....	49
3.1 Оценка состояния и анализ биологического ресурса луговых фитоценозов по результатам натурных исследований.....	49
3.2 Результаты дистанционного мониторинга фитоценозов.....	60
3.3 Сравнительный анализ результатов исследования.....	77
4. ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ.....	82
4.1 Пространственно-временная дифференциация биологического ресурса.....	82

4.2	Модель сезонной динамики надземной фитомассы растительного сообщества на основе данных дистанционного мониторинга.....	85
4.3	Способ оптимизации использования биологического ресурса луговых фитоценозов Воронежской области.....	91
5.	БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	100
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
	РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....	105
	ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	108
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	110
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	138

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Ведение хозяйственной деятельности человека с использованием биологического ресурса естественных экосистем в настоящее время обусловлено высокой экономической эффективностью данного процесса. В условиях Центрально-Черноземного региона активно используется надземная фитомасса луговых травяных сообществ, сформированных природными видами растений. В зависимости от специфики сельскохозяйственного производства, биологический ресурс лугов обеспечивает функционирование пастбищ, сенокосов или смешанного типа сельскохозяйственного использования. Антропогенная нагрузка, возникающая при ведении хозяйственной деятельности затрагивающей природные экосистемы, сопровождается увеличением рисков деградации биоценозов, снижения разнообразия, устойчивого воспроизводства ценных видов живых организмов и их продуцентных свойств. При этом важное значение имеет возможность организации рационального подхода к использованию биологического ресурса природных популяций растительных организмов, используемых в постоянной хозяйственной деятельности человека, что требует наличия эффективных методов мониторинга и учета пространственно-временной динамики функционирования растительных сообществ на используемой территории. Традиционно известны способы мониторинга состояния растительного покрова, основанные на прямых измерениях и количественных подсчетах. Данные виды исследований при высокой точности измерений имеют ряд недостатков, таких как: высокая трудоемкость натуральных измерений, низкая производительность и ресурсоемкость работ (охват в единицу времени), ограниченная масштабируемость, сложность автоматизации. В текущих условиях высокую значимость имеет задача повышения эффективности методов мониторинга, учета и оценки функционального состояния растительных сообществ

природных видов, используемых в качестве ценного биологического ресурса, и имеющих определенный потенциал в развитии сельскохозяйственного производства.

Ключевыми требованиями при этом являются: низкая ресурсозатратность, короткая периодичность, легкая масштабируемость. В настоящей работе представлены результаты исследования, описывающие возможность применения новых способов мониторинга и учета пространственно-временной динамики вегетации видов, формирующих хозяйственно-ценные растительные сообщества лугов представительных районов Воронежской области, основанных на анализе материалов дистанционной мультиспектральной съемки.

**Степень разработанности темы.** В настоящее время известны работы, направленные на изучение динамики и функционального состояния луговой растительности в различных почвенно-климатических условиях. Большой вклад в исследования продуктивности травяных экосистем внесли Титлянова А. А., Базилевич Н. И., Шмакова Е. И., Снытко В. А., Дубынина С. С., Магомедова Л. Н., Нефедьева Л. Г., Семенюк Н. В., Тишков А. А., Ти Тран, Хакимзянова Ф. И., Шатохина Н. Г., Кыргыз Ч. О., Самбуу А. Д., описав структуру растительного вещества и первичной продукции в различных почвенно-климатических условиях на примере регионов Русской равнины, Западной Сибири, Забайкалья, Северного Кавказа, Казахстана и т.д. [22, 28, 32, 35, 97, 121, 122, 128, 129]. Отличительной особенностью большинства предыдущих исследований функционирования природных луговых экосистем является использование классических методов прямых измерений для учета количественных характеристик сезонной продуктивности фитоценозов и оценки пространственной дифференциации надземной фитомассы. А. Л. Силаев, Е. В. Смольский, И. Н. Белоус, В. Ф. Шаповалов в работах по исследованию управления продуктивностью естественных лугов Брянской области использовали метод прямого количественного измерения урожайности зеленой массы в момент укоса на

учетных площадках площадью 1 м<sup>2</sup> [24, 25, 26, 27, 98, 118]. В работах И. В. Шмидта, А. М. Латыповой, Н. Г. Лапенко, А. Г. Буховца, А. Л. Тойгильдина, Ю. А. Куликова проводились исследования методов дистанционного мониторинга пространственно-временной динамики развития посевов сельскохозяйственных культур на основе материалов космосъемки [36, 50, 82, 99, 113, 145, 154]. Также известны исследования по дистанционному мониторингу состояния степной растительности пастбищ степных территорий для оценки рисков пастбищной дигрессии [85, 92, 107, 133]. При этом схожие исследования применительно к задачам мониторинга и оценке функционального состояния значимого для аграрного производства биологического ресурса природных хозяйственно-ценных угодий, сформированных луговыми растительными сообществами Центрально-Черноземного региона отсутствуют, что обосновывает актуальность данной работы.

**Цели исследования:** провести сравнительный анализ методов мониторинга пространственно-временной динамики развития надземной фитомассы луговых растительных сообществ с последующей разработкой способа оптимизации сельскохозяйственного использования биологического ресурса хозяйственно-ценных фитоценозов пойменных лугов представительных районов Воронежской области.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ методов мониторинга динамики состояния растительных ассоциаций луговых биоценозов.

2. Провести сравнительный анализ региональных особенностей функционирования и сезонной динамики продуктивности фитоценозов природных пойменных лугов представительных районов Воронежской области, выявив возможности сохранения биологического ресурса хозяйственно-ценных природных популяций луговых растений.

3. Выявить закономерности многолетней динамики вегетации природных растительных ассоциаций луговых биоценозов на основе мониторинга представительных территорий.

4. Разработать модель дистанционной оценки сезонной продуктивности надземной фитомассы растительных сообществ пойменных лугов.

5. Предложить способ оптимизации сельскохозяйственного использования биоресурсного потенциала природных хозяйственно-ценных растительных сообществ лугов.

**Научная новизна.** Осуществлен сравнительный анализ функционирования растительных сообществ пойменных лугов различных природно-климатических зон Воронежской области. Впервые проведен мониторинг природных луговых фитоценозов с использованием мультиспектральной спутниковой съемки, позволяющий дать динамическую оценку вегетации и выработать модель рационального использования биологического ресурса для конкретной территории. Предложен способ пространственно-временной дифференциации использования территории, занятой природным луговым фитоценозом и имеющей сельскохозяйственное значение в зависимости от природно-климатических условий. Разработана модель, позволяющая прогнозировать предубоенное количество надземной фитомассы на единицу площади луга. Предложен метод оценки валовой питательности скашиваемой растительной массы на основе данных количественной прогностической модели.

**Практическая значимость работы.**

Установлена количественная взаимосвязь сезонной динамики надземной фитомассы лугов с изменением значений вегетационного индекса NDVI выражающаяся в высокой корреляции с  $r > 0,93$ .

Предложенный способ оптимизации хозяйственного использования луговых фитоценозов, заключающийся в пространственной дифференциации зон сенокошения или выпаса скота при построении карт вегетационного

индекса для раннего обнаружения локальных очагов деградации растительного покрова, прогнозировании сроков и объемов кормозаготовки, позволяет провести оценку питательности травяной массы представительных районов Воронежской области, что способствует рациональному использованию биоресурсного потенциала хозяйственно-ценных растительных сообществ, с минимальными организационно-временными затратами в условиях аграрного производства.

**Методология и методы исследования.** Мониторинг пространственно-временной динамики развития хозяйственно-ценной надземной фитомассы природных пойменных лугов был выполнен двумя способами – прямым измерением при натурном обследовании и дистанционным при обработке материалов мультиспектральной съемки. Прямое измерение количества фитомассы выполнялось методом учета по рамке с площадью 0,25 м<sup>2</sup> в соответствии с существующими рекомендациями и опытом работ других исследователей в отношении аналогичных объектов. Для взвешивания фитомассы использовались электронные весы с предварительной калибровкой поверенным разновесом в соответствии с ГОСТ Р 53228-2008. Определение видового состава выполнялось с использованием полевых определителей зональной растительности. Для дистанционного мониторинга использовались карты индекса NDVI, созданные на основе материалов мультиспектральной съемки уровня L1C, полученных от орбитального аппарата Sentinel-2. Математическая обработка данных выполнялась с использованием Microsoft Excel. Для работы с пространственными растровыми и векторными данными использовалось ПО «Quantum GIS». Обработка материалов мультиспектральной съемки и построение карт индекса NDVI производились в ПО «АгроСигнал».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Растительные сообщества природных хозяйственно-ценных пойменных лугов представительных районов Воронежской области отличаются по показателям пиковой сезонной продуктивности в зависимости

от природно-климатических условий территории. Максимальный среднегодовое количество надземной фитомассы обнаруженный при прямом измерении составляет 1,05 кг/м<sup>2</sup> в Богучарском районе, 0,85 кг/м<sup>2</sup> в Таловском районе, 0,79 кг/м<sup>2</sup> в Семилукском районе, 0,61 кг/м<sup>2</sup> в Терновском районе.

2. Фитоценозы представительных луговых территорий демонстрируют при прямом измерении продукционную характеристику надземной фитомассы с высокой корреляцией ( $r > 0,93$ ) к значениям разностного вегетационного индекса NDVI, получаемого дистанционным способом, что дает основания считать дистанционный метод мониторинга на основе мультиспектральной съемки применимым для решения задач оценки пространственно-временной динамики распределения вегетирующей биомассы естественных лугов в широких масштабах.

3. Взаимосвязь значений спектрального индекса с количеством надземной фитомассы позволяет планировать оптимальные сроки сенокоса (при достижении значений NDVI: 0,84 – 0,89 для Семилукского, 0,71 – 0,80 для Терновского, 0,88 – 0,91 для Таловского и 0,87 – 0,91 для Богучарского районов) с возможностью предсказания валового сбора (расчетная формула прогностической модели:  $P_m, \text{ кг/м}^2 = 1,3338 * NDVI - 0,3023$ ) и питательности (расчетная формула валовой питательности:  $P_v, \text{ корм.ед./га} = Y_{\text{п}} * K_v * P$ ) травяной массы на единицу площади луга.

4. Способ оптимизации сельскохозяйственного использования биологического ресурса природных луговых территорий на основе дистанционного мультиспектрального мониторинга применим для исследования потенциала хозяйственно-ценных фитоценозов с минимальными организационно-временными затратами в условиях аграрного производства.

**Достоверность результатов** исследования обеспечивается широким географическим охватом объектов исследования в пределах Воронежской области и многолетним периодом измерений. Методы исследования выбраны

в соответствии с существующими общепринятыми подходами применительно к задачам и объектам. Данные, полученные в ходе выполнения работы, подвергнуты статистической обработке.

**Личный вклад автора.** Автором была разработана программа исследования, в соответствии с которой в период с 2019 по 2024 год проведен анализ методов мониторинга и оценки функционального состояния природных видов растений луговых травяных сообществ, выполнены натурные измерения по исследуемым объектам, собраны и обработаны материалы мультиспектральной космосъемки, обобщены и проанализированы результаты измерений на основе которых сделаны выводы, выносимые на защиту.

**Апробация работы.** Данные, полученные в ходе выполнения исследования, были доложены на XIV Международной научно-практической конференции “Интерагромаш 2021” (Ростов-на-Дону, 2021 г.), IX Международной научно-практической конференции «Производство и переработка сельскохозяйственной продукции» (Воронеж, 2023 г.), V Международной научно-практической конференции «Передовые достижения науки в молочной отрасли» (секция «Кормопроизводство как необходимый ресурс молочной промышленности») (Вологда, 2023 г.), Международной научно-практической конференции «Вавиловские чтения – 2023» (Саратов, 2023 г.), VI национальной научно-практической конференции «Теория и практика инновационных технологий в землеустройстве и кадастрах» (Воронеж, 2023 г.), II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь.Наука.Инновации» (секция «Ресурсосберегающие технологии в земледелии») (Ярославль, 2024 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы и приоритетные направления развития ветеринарной медицины, зоотехнии и экологии» (Рязань, 2024 г.), Международной научно-практической конференции «Вызовы и инновационные решения в аграрной

науке» (Белгород, 2024 г.), Национальной научно-практической конференции «Циркулярная экономика для целей устойчивого развития отраслей и территорий» (Воронеж, 2024 г.), Национальной научно-практической конференции «Теория и практика инновационных технологий в АПК» (Воронеж, 2024 г.).

**Публикации по теме исследования.** По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации базы данных (№2024621868 от 02.05.2024), созданной в ходе выполнения работы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 188 страницах, содержит следующие разделы: введение, главы 1 – 5, заключение, перспективы дальнейшей разработки темы, список литературы и приложения. Библиографический список содержит 170 источников, в том числе 19 на иностранном языке. Иллюстративный материал представлен в 17 таблицах, 45 рисунках и 5 приложениях.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ

## 1.1 Разнообразие и биоресурсный потенциал хозяйственно-ценных видов растительных организмов луговых территорий ЦЧР

Растительный покров лугов Центрального Черноземья представлен травянистыми сообществами, включающими широкий перечень видов, среди которых значительное распространение имеют *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub. (кострец безостый), *Poa angustifolia* L. (мятлик длиннолистный), *Elytrigia repens* L. (пырей ползучий), *Festuca pratensis* Huds. (овсяница луговая), *Alopecurus pratensis* L. (лисохвост луговой), *Beckmannia eruciformis* (L.) Host (бекмания обыкновенная), *Juncus compressus* Jacq. (ситник сплюснутый), *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult. (ситняг болотный), *Carex riparia* Curtis (осока береговая), будучи приуроченными к более увлажненным участкам. На возвышенных территориях встречаются *Festuca valesiaca* Gaudin (овсяница валисская), *Agrostis tenuis* Sibth. (полевица тонкая). Двудольные представлены сообществами, включающими *Trifolium pratense* L. (клевер луговой), *Trifolium medium* L. (клевер средний), *Trifolium repens* L. (клевер ползучий), *Trifolium fragiferum* L. (клевер земляничный), *Trifolium hybridum* L. (клевер гибридный), *Coronilla varia* L. (вязель разноцветный), *Lotus corniculatus* L. (лядвенец рогатый), *Lathyrus pratensis* L. (чина клубненосная), *Lathyrus pratensis* L. (чина луговая), *Melilotus officinalis* (L.) Lam. (донник лекарственный), *Melilotus albus* Medik. (донник белый). Среди разнотравья лугов ЦЧР присутствуют виды *Campanula glomerata* L. (колокольчик скученный), *Campanula patula* L. (колокольчик раскидистый), *Dianthus superbus* L. (гвоздика пышная), *Dianthus deltoides* L. (гвоздика травянка), *Coronaria flos-cuculi* (L.) Fourr. (горицвет кукушкин), *Draba sibirica* (Pall.) Thell. (крупка сибирская), *Sanguisorba officinalis* L. (кровохлебка лекарственная) [3, 4, 5, 6, 7, 67, 85, 106, 111, 138, 139].

Пойменные луга, приуроченные к долинам малых рек, формируют сообщества гигромезофилных видов, развивающихся в условиях высокой влагообеспеченности. В ряде случаев, особенно в южных районах Воронежской области, для лугов речных пойм характерны галофильные сообщества, развивающиеся в условиях засоления при недостаточной дренированности почв. Луговые степи и остепненные луга в Центральном Черноземье развиваются на плакорных участках [47, 48, 114].

Биологический ресурс продуцентов луговых сообществ находит хозяйственное применение при организации пастбищ и сенокосов на территории региона. По данным Росстата из 3,67 млн. га территории Воронежской области, на долю сельскохозяйственных угодий приходится 3,54 млн. га. В сельскохозяйственном производстве используется около 517 тыс. га сенокосов и пастбищ, часть из которых природного происхождения и сформированы сообществами травянистых растений [61]. В Российской Федерации суммарная площадь природных пастбищ и сенокосов составляет 91 млн. га [78]. В зависимости от преобладающих типов животноводства, надземная фитомасса лугов используется как подножный корм при свободном выпасе скота, либо скашивается для заготовки сена и последующего скармливания в межсезонье или при стойловом содержании. Хозяйственная ценность луговых растений обусловлена высокой экономической эффективностью использования биоресурса природных видов в отсутствие затрат на технологические операции, традиционно сопровождающие процесс растениеводства и кормопроизводства при возделывании сельскохозяйственных культур.

Объем сезонной биологической продукции луговых сообществ достаточно высок для обеспечения возможности использования зеленой массы растений в качестве корма для сельскохозяйственных животных. По информации А. А. Титляновой (2018), максимальные значения количества надземной фитомассы (без учета мормомассы и подстилки) плакорных лугов на автоморфных почвах в Курской области достигают 770 г/м<sup>2</sup> или 77 ц/га

для узколистно-мятlikово-безостокостровой и узколистно-мятlikово-пырейной микрогруппировок [28, 32, 128, 129].

Высокую хозяйственную ценность в условиях хорошей влагообеспеченности имеют луговые сообщества с преобладанием злаковых видов, образующих высокий травостой, наиболее пригодный к механизированному скашиванию и валкованию. К данной группе относятся пойменные луга, сформированные на гидроморфных и полугидроморфных почвах с высоким запасом элементов минерального питания. В Центральном Черноземье развитая сеть малых рек с обильным меандрированием обуславливает распространенность пойменных лугов. При этом видовой состав луговых сообществ варьирует в зависимости от почвенно-климатической зоны и местных условий. Травяные сообщества лугов образуют сомкнутый травостой без выраженной ярусности, что препятствует развитию почвенной эрозии и создает благоприятную среду обитания для мезофауны.

Н. Н. Лазарев (2018) отмечает, что использование природных лугов в качестве сенокосов и пастбищ благоприятно сказывается на санитарно-гигиеническом аспекте животноводческих ферм в связи тем, что биологическая продукция луговых фитоценозов формируется в отсутствие антропогенного влияния в форме применения средств химизации. Содержание нитратов в надземной фитомассе естественных луговых угодий в 1,2 – 3 раза ниже, чем в кормах, получаемых при выращивании по интенсивной технологии. Аналогичные отличия наблюдаются в отношении тяжелых металлов – их содержание в луговых растениях в 1,2 – 2,2 раза меньше, чем в тканях культивируемых растений. Кроме того, дегельминтизация растительного покрова лугов при использовании в качестве пастбища происходит всего за 11 – 15 дней [131].

В соответствии с классификацией Л. Г. Раменского, сенокосы и пастбища делятся на несколько классов и подклассов. Для высокопродуктивных пойменных лугов степной и лесостепной зон

выделяется два основных класса – краткопоемные и долгопоемные. В таблице 1 приведена характеристика подклассов лугов с указанием типичных для таксона видов растений [90, 108, 110].

Таблица 1 – Классификация сенокосов и пастбищ по Л. Г. Раменскому (луга степной и лесостепной зоны).

Класс	Подкласс	Описание
С-5		Краткопоемные луговые на пойменных луговых почвах степной и лесостепной зон
С-5	а	Злаковые и разнотравно-злаковые сухие луга на пойменных луговых почвах Виды: кострец безостый, типчак, пырей ползучий, мятлики луговой и узколистый, овсяница красная, тонконог Делявина, люцерна серповидная, кровохлебка лекарственная, полынь эстрагон, подмаренник, василек луговой, черноголовка обыкновенная, алтей лекарственный, жабрица порезниковая, василисник, крестовник.
С-5	б	Злаково-разнотравные влажные и сырые луга на пойменных луговых почвах Виды: полевицы беловатая и собачья, лисохвост луговой, пырей ползучий, мятлик луговой, щучка дернистая, клевера луговой и ползучий, осока, герань луговая, лютик, лапчатка.
С-5	в	Разнотравно-злаковые сухие и влажные луга на засоленных почвах Виды: триостренник морской, кермек Гмелина, морковник обыкновенный, полынь селитряная, лисохвост тростниковый, пырей ползучий, волоснец Пабо, ячмень

		короткоостистый, овсяница Регеля, клевер горный, люпинник пятилистный, астрагалы, лядвенец рогатый, подорожник солончаковый, астра солончаковая, горькуша, кобрезия.
С-6		Долгопоемные луговые на пойменных луговых почвах степной и лесостепной зон
С-6	а	Злаковые и злаково-разнотравные свежие и влажные луга Виды: кострец безостый, пырей ползучий, чий, овсяницы луговая и красная, тимофеевка луговая, полевица беловатая, клевер луговой, люцерна серповидная, подмаренник настоящий, кровохлебка лекарственная, осоки ранняя, лисья, пузырчатая, черноколосая, ситник, девясил, хвощ, лютик, клубнекамыш.
С-6	б	Злаково-разнотравно-осоковые крупнотравные сыроватые и сырые луга Виды: полевица гигантская, вейник наземный, лисохвост луговой, бекмания обыкновенная, пырей ползучий, двукисточник тростниковидный, осоки острая, ранняя и блестящеплодная, лютик, ситник, хвощ, солодка голая, подмаренник ложноприручейный, тмин, чий, мята, василисник желтый, спаржа лекарственная.

Основным потребителем биопродукции лугов, при использовании их в качестве сенокосов и пастбищ, является крупный и мелкий рогатый скот. По данным Росстата за 2022 год в Воронежской области насчитывается 489,0 тысяч голов крупного рогатого скота и 176,8 тысяч голов мелкого рогатого скота. При этом на долю крестьянских (фермерских) хозяйств и личных хозяйств населения (ЛПХ) приходится 26,9% от общего поголовья КРС и 92,1% МРС (овцы и козы). Значительная часть поголовья крупного и мелкого рогатого скота, находящаяся на содержании в личных хозяйствах населения

(17,6 и 67,7% от общего количества, соответственно), обуславливает высокую потребность в доступных и дешевых кормах, обладающих при этом высокой кормовой ценностью и являющихся экологически безопасными [123]. По информации И. М. Суркова (2015), численность поголовья КРС и МРС в личных хозяйствах населения Воронежской области является наименее изменчивой величиной – анализ статистических данных показывает изменение (уменьшение) численности поголовья по отдельным категориям рогатого скота на интервале с 1990 по 2014 г.г. на уровне не более, чем в 1,1 раза [126, 127]. Это в совокупности с недавними сведениями Росстата подтверждает наличие потребности в кормовой базе, обладающей наименьшей себестоимостью и достаточной энергетической ценностью. Надземная фитомасса пойменных лугов региона обладает всеми требуемыми свойствами, необходимыми для использования в качестве корма для распространенных в области форм традиционного животноводства.

В степной и лесостепной зоне, на пойменных лугах значительное распространение имеют злаковые травы, которые в фазе цветения содержат около 10% сырого протеина, 2,9% жира и 31% клетчатки. При этом, 1 центнер сена, получаемого из злаков, имеет кормовую ценность на уровне 40 – 45 единиц. Двудольные травы, при сходной со злаковыми общей кормовой ценности, отличаются более высоким содержанием протеина (до 18-19%), что является важным показателем при оценке структуры рациона сельскохозяйственных животных [14, 78, 87, 131].

На данный момент известны работы В. Д. Собакинских, Г. А. Рыжковой, О. В. Рыжкова, Е. А. Авериновой по изучению продуктивности фитомассы луговой степи Центрально-Черноземного заповедника. Результаты недавних исследований опытных заповедных участков разнотравно-узколистно-мятликово-перистоковыльной ассоциации показывают, что на долю злаковых трав приходится 68% зеленой массы луга, разнотравье занимает 28%, бобовые – менее 1%, осоки – более 3% [1, 2, 47, 48, 114, 137, 138].

Преобладание злаков среди ассоциаций лугов лесостепной и степной зоны обуславливает рассмотрение их в качестве основного компонента в структуре кормового использования биологического ресурса фитоценоза.

На территории Воронежской области изучение лугов как ценных природных кормовых угодий ведется с 1911 года, когда Леонтий Григорьевич Раменский начал исследования, необходимость проведения которых была сформулирована такими учеными как Б.А. Келлер, Г.Ф. Морозов, К.Д. Глинка, В.А. Дубянский, работавшими в Воронежской губернии в начале XX века. С 1912 года Л.Г. Раменским были организованы постоянные наблюдения за лугами близ г. Павловска, где имели распространение широкие поймы рек Осередь и Дон. Позже эти работы были продолжены в Павловской луговой опытной станции, существующей до настоящего времени и являющейся филиалом ФНЦ «ВИК им. Вильямса» [37]. В период с 1932 по 1980 г.г. было выполнено два тура инвентаризации природных кормовых угодий Воронежской области, которые проходили в рамках всесоюзного районирования [10, 11].

Большой вклад в изучение состояния и продуктивности природных лугов Воронежской области внес М. И. Ненароков, руководивший Павловской луговой опытной станцией в середине XX века. В работах Михаила Ивановича Ненарокова приведены сведения о состоянии, составе и свойствах естественных кормовых угодий региона. Систематизированная информация позволила получить знания о ценном биологическом ресурсе и наметить пути его последующего использования, сохранения и улучшения. В монографии «Сенокосы и пастбища Воронежской области» (1959) Ненароков приводит данные о площадях естественных сенокосов и пастбищ в регионе, которые в сумме занимали 607,3 тыс. га, что немного больше современных значений. При этом высокопродуктивные пойменные луга занимали 74,5% от площади сенокосов и 4,3% от площади пастбищ [93, 94].

М. И. Ненароков отмечал, что разнообразие пойменных лугов, приуроченных к долинам малых рек, обусловлено характером и степенью

увлажнения. Источниками влаги для луговых растительных сообществ являются атмосферные осадки, воды весеннего половодья и грунтовые воды. Высокая биологическая продукция пойменных лугов в условиях благоприятного водного режима, обуславливает использование этих территорий в качестве сенокосов и пастбищ. В случае пастбищного использования, травостой пойменных лугов достаточно быстро обнаруживает выраженные признаки пастбищного перерождения, что негативно сказывается на поддержании устойчивого функционирования фитоценоза луга и определяет предпочтительный вид хозяйственного использования их в качестве сенокоса.

По информации М. И. Ненарокова на территории Воронежской области встречаются следующие типы пойменных лугов:

- 1) Разнотравно-мелкозлаковые луга свежего характера увлажнения, приуроченные к возвышенным участкам пойм с летним уровнем залегания грунтовых вод не выше 1,5 метров. На лугах данного типа развивается невысокий плотный травостой.
- 2) Влажные разнотравно-злаковые луга, образующиеся на менее дренированных участках центральной поймы с уровнем грунтовых вод от 1,0 до 1,4 метра от дневной поверхности. Травостой их представлен значительной долей влаголюбивых злаков, таких как щучка дернистая и полевица белая.
- 3) Сыроватые луга, расположенные на низменных участках менее дренированной притеррасной полосы, для которых характерна летняя глубина грунтовых вод 0,6 – 0,8 метра. В травостое господствует щучка дернистая с небольшой долей полевицы проползающей.
- 4) Сырые кочковатые луга, формируются на слабодренированных притеррасных участках. В растительном покрове преобладает осока дернистая. Из злаковых трав встречается полевица проползающая, а из бобовых часто отмечается чина болотная. Кормовые качества фитомассы сырых кочковатых лугов считаются низкими, т.к. осока

дернистая, являющаяся преобладающим видом, плохо поедается КРС всех половозрастных групп.

5) Сырые луга, встречаются на пониженных участках пойм с застоем воды после весеннего половодья и неглубоким залеганием грунтовых вод (выше 0,5 метра) в летний период. Из злаковых встречается полевица проползающая, лисохвост вздутый. Вместе со злаками в наиболее увлажненных местах присутствует осока стройная. Бобовые представлены клевером ползучим и клевером розовым. Особенностью лугов данного типа является позднее высыхание и возможность интенсивного отроста травостоя в июле на фоне близкого залегания грунтовых вод.

Урожайность зеленой массы пойменных лугов Воронежской области оценивалась Ненароковым на уровне 35 – 45 ц/га для возвышенных лугов и 60 – 70 ц/га для влажных лугов [93].

Дальнейшие исследования естественных лугов Воронежской области проводились преимущественно в рамках решения прикладных задач, среди которых были работы по улучшению и окультуриванию лугов для повышения эффективности кормопроизводства. Логическим продолжением работ, начатых под руководством Л. Г. Раменского, стало районирование природных кормовых угодий (ПКУ) страны, которое проходило в несколько этапов и к настоящему времени легло в основу агроландшафтно-экологического атласа ПКУ, разработанного в 2023 году силами ФНЦ «ВИК им. Вильямса» для обеспечения возможности ведения рационального природопользования и ландшафтно дифференцированного сельского хозяйства [130].

## **1.2 Методологические основы изучения динамики состояния растительных организмов луговых биоценозов**

Задачи исследования природных объектов и систем требуют использования непротиворечивой и обоснованной методологической базы.

Растительные сообщества природных территорий представляют собой сложную многокомпонентную гетерогенную систему, в которой элементарной единицей наблюдения и учета могут являться и отдельные растения присутствующего вида, и локальная группа растений представительного участка территории. Также важной характеристикой может являться пространственная вариативность растительного покрова изучаемого объекта.

Изучение природных растительных сообществ обычно включает в себя комплекс методов, дающих представление о видовом составе определенной территории, морфологических характеристиках отдельных видов и особей, массовых характеристиках целых растений или их частей и органов, а также их изменчивости в пространстве и времени. Описательные методы используются для сбора информации о свойствах или особенностях объекта исследования, которые не поддаются прямому инструментальному измерению. К таким свойствам относят, например, цвет, форму, тип строения растений. Измерительные методы представляют собой совокупность способов, используемых для определения размеров, массы и прочих характеристик, поддающихся прямому измерению. Кроме того, существуют методы исследования косвенных признаков, на основании которых производится оценка тех или иных свойств исследуемого объекта.

При изучении растительного покрова и фитоценозов определенной территории важную роль играет выбор метода получения представительных данных, собираемых в ходе натурного исследования. В. С. Ипатов и Д. М. Мирин в методических указаниях по описанию фитоценоза (2008) приводят способы выбора учетных площадок и определения их размеров для получения объективных данных, характеризующих микрогруппировки растений и фитоценоз в целом. Отмечается, что идеальным способом является описание фитоценоза в пределах всего его контура для выявления пространственных вариаций, но данный подход применяется крайне редко по причине его трудоемкости. В связи с этим, общепринятым считается метод,

основанный на выборе типичных участков с разбивкой учетных площадок, размер которых варьирует в зависимости от типа природных угодий. Для условий лесного массива рекомендуется размер площадок квадратной или прямоугольной формы со сторонами от 20х20 до 50х50 метров. В случаях описания растительности лугов, рекомендованы площадки с площадью 1 м<sup>2</sup> [57, 59]. Соответственно, все количественные характеристики, измеряемые в пределах учетных площадок, далее могут быть интерполированы на всю площадь изучаемого объекта, что используется для оценки текущего состояния и свойств растительного покрова территории, а также как сравнительный базис для динамических наблюдений.

Для оценки видового состава растительной группировки и определения количественного соотношения видов, применяется прямой подсчет по учетным площадкам, как правило, без отчуждения растений. При оценке количества надземной фитомассы производится срезание растений в пределах учетной площадки с последующим взвешиванием в состоянии естественной влажности. Оптимальной для определения массы травостоя луговой растительности является площадка 0,25 м<sup>2</sup>, которая позволяет с небольшими временными затратами обеспечить серию измерений из нескольких повторов, тем самым повысив репрезентативность. На практике для разметки границ учетных площадок небольшой площади (0,25 – 1 м<sup>2</sup>) используется квадратная рамка с соответствующей внутренней длиной стороны, изготавливаемая из дерева, пластика или легких металлических сплавов [88].

В ходе подготовки и проведения настоящего исследования, автором был изучен опыт применения методов и инструментов, используемых другими исследователями по отношению к аналогичным или близким объектам в похожих условиях. Растительный покров природных территорий лесостепной и степной зоны часто является объектом высокого научного интереса. Это обусловлено многими факторами, среди которых присутствуют задачи экологического мониторинга, динамической оценки

состояния угодий, использующихся в хозяйственной деятельности человека или подвергшихся разного рода воздействиям, а также наблюдения за охраняемыми природными объектами.

В работах А. А. Титляновой приводятся сведения о продуктивности травяных экосистем, где в основе лежит серия измерений фитомассы на учетных площадках площадью  $0,25 \text{ м}^2$ , проводимых в течение нескольких лет, по 3 – 5 раз за сезон. Количество надземной фитомассы в ходе этих исследований определялось путем среза растений в пределах учетной площадки с последующим взвешиванием и дифференциацией по фракциям в соответствии с задачами и целями исследования. Указанный подход применялся во всех географических регионах, входивших в план исследования в разные периоды [28, 32, 128]. Метод измерения фитомассы позволил оценить продуктивность природных растительных сообществ, сформированных видами травянистой растительности, а также выявить сезонную и многолетнюю динамику процесса.

Н. В. Овчарова и Т. А. Терехина при исследовании луговой растительности применяли метод трансект, что представляет собой линейную непрерывную последовательность учетных площадок, с которых срезалась надземная часть растений с последующим разделением по видам и взвешиванием при естественной влажности или после высушивания. В рамках данного исследования решались задачи изучения динамики восстановления природного луга после пастбищной дигрессии, возникшей на фоне интенсивного хозяйственного использования природных территорий [95, 96].

Изучение динамики накопления растительной биомассы в пойменном фитоценозе, проведенное А. П. Пехотой (Пехота и др., 2013), основывалось также на известном методе учетных площадок. В квадратной рамке со стороной 50 см производился подсчет видов с последующим срезанием и взвешиванием растений. Результаты измерений в рамке были пересчитаны на  $1 \text{ м}^2$ . Целью работы было изучение состава и продуктивности

микрोगруппировок растительного сообщества как элемента горизонтальной структуры пойменного луга, представляющего высокую хозяйственную ценность для организации кормопроизводства [101, 102].

Т. И. Казанцева, Н. И. Бобровская и В. В. Тищенко при выполнении работ по изучению особенностей восстановления залежной растительности луговых степей Центрального Черноземья на примере Каменной степи Воронежской области, проводили подсчеты травянистой растительности на площадках в  $1 \text{ м}^2$ . В ходе исследования было заложено 20 таких площадок, которые были обследованы в соответствии с планом работ, давая представительную картину изучаемого объекта [62, 109].

В исследованиях, проводимых А. Л. Силаевым, Е. В. Смольским, И. Н. Белоусом и В. Ф. Шаповаловым, одной их ключевых целей являлось изучение возможностей управления продуктивностью естественных кормовых угодий на примере заливного пойменного луга. Авторами был заложен опыт, для изучения отклика луговой растительности на внесение различных доз минеральных удобрений. При этом основным критерием оценки был показатель «урожайности» надземной фитомассы выраженной в сухом весе, как характеристика продуктивности растений в разных условиях обеспеченности элементами минерального питания. Измерения проводились по двум укосам (середина июня и конец августа) с учетных площадок размером  $1 \text{ м}^2$ . Для учета пространственной неоднородности растительного покрова и определения изменчивости продуктивности луга авторы использовали коэффициент вариации, выражаемый в процентах, в качестве критерия оценки выборки полученных значений [24, 25, 26, 27, 98, 118, 120, 132, 148, 150].

Анализ работ, затрагивающих исследования травянистой растительности природных угодий, показывает общую применимость метода количественных измерений на учетных площадках для широкого круга целей и задач. В большинстве случаев, авторы использовали рамки с площадью от  $0,25$  до  $1 \text{ м}^2$  для проведения подсчетов густоты, высоты, массы растений,

видового состава и прочих характеристик. Применимость метода обусловлена возможностью его унификации, обеспечивающей репрезентативность и сравнимость результатов измерений. Зачастую, результаты замеров, получаемых с учетной площадки фиксированного размера, в зависимости от целей исследования интерполируются на 1 м<sup>2</sup> или 1 га, что делает возможным сопоставление значений того или иного показателя с аналогами, получаемыми в других условиях или в другие периоды.

Для оценки биологической продуктивности травяных сообществ лугов может быть использован показатель массы надземных частей растений при естественной влажности с единицы площади [32]. Данный подход обусловлен возможностью учета изменений физиологического состояния растений в различные периоды вегетации, а также дифференцированным измерением различных фракций (живые органы растений и мормасса) при соответствующих задачах исследования.

В последнее десятилетие помимо натуральных прямых измерений получили распространение инновационные методы исследований состояния и динамики растительной биомассы, основанные на дистанционной оптической мультиспектральной съемке [152-170]. Способность живых растений избирательно поглощать и отражать солнечное излучение на определенных участках спектра, позволяет применять методы сравнительной комбинации спектральных каналов для дифференцированной классификации растительного покрова по материалам мультиспектральной аэрофото- и космосъемки. В настоящее время разработан ряд спектральных вегетационных индексов, характеризующих состояние и свойства растительного покрова при дистанционных исследованиях. Наиболее широко применяются индексы разностной группы, к которым относятся EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) и другие. Для оценки временной динамики зеленой биомассы и ее пространственной вариативности часто

применяется индекс NDVI, который основан на количественной оценке интенсивности поглощения и отражения тканями растений двух спектральных диапазонов – красного и ближнего инфракрасного с длиной волны 650 – 680 нм и 785 – 799 нм, соответственно. Расчетная формула индекса NDVI содержит в себе отношение разности к сумме значений интенсивностей инфракрасного и красного спектральных каналов [46, 67, 82, 113, 152, 153, 157, 159, 160, 161, 168].

Основным источником первичных данных для расчета спектральных вегетационных индексов служат материалы орбитальной космосъемки, получаемые с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, имеющих возможность поканальной съемки в различных диапазонах спектра. В настоящее время орбитальные группировки космических аппаратов (КА) для мультиспектральной съемки имеют Россия, Китай, Индия, Европейский Союз, США. Для решения производственных и исследовательских задач в области природопользования и сельского хозяйства регулярно применяются материалы космосъемки с пространственным разрешением 250 метров на пиксель (КА MODIS/Terra), 30 метров на пиксель (КА Landsat 8), 10 метров на пиксель (КА Sentinel 2) [29, 72, 115].

В исследовании К. А. Кургановича и А. В. Шаликовского, целью которого было изучение отклика растительных сообществ речной поймы р. Аргунь на изменение речного стока, использовался ряд вегетационных индексов, получаемых после обработки материалов съемки КА MODIS. Вегетационные индексы в данной работе служили индикатором динамики развития наземной фитомассы в пойме, что, по мнению авторов, являлось косвенным признаком изменения гидрологических условий речной долины [60, 77].

А. А. Комаров, А. Д. Кирсанов и С. Н. Малашин применяли вегетационный индекс NDVI в качестве основного инструмента при исследовании оптимальных сроков уборки кормовых трав. В работе

применялся анализ карт индекса NVDI, полученных на основе серии снимков КА Sentinel 2 в различные периоды вегетационного сезона. Динамика изменения значений вегетационного индекса служила индикатором изменения уровня надземной фитомассы в привязке к разным фазам вегетации, что являлось основой для выбора времени уборки посева кормовых трав. В результате сопоставления информативности индекса NDVI с прочими вегетационными индексами (SAVI, ARVVI, EVI, NDWI) авторами было обосновано преимущество данного индекса для оценки динамики вегетации и пространственного распределения биомассы на посевах кормовых трав в рамках решения ряда значимых производственных задач [54, 64, 65, 67, 68].

Исследование динамики вегетационного индекса на участке лугового фитоценоза проводилось А. А. Калгановым. Работа включала в себя расчет и анализ значений индекса NDVI в течение вегетационного сезона 2021 года для участка в границах прибрежной полосы озера. На основе проведенных исследований была выявлена амплитуда вариаций значений индекса, соответствующая пространственной неравномерности развития луговой растительности, и определен период максимального уровня надземной фитомассы [63].

При изучении пространственной структуры травяных растительных сообществ степи Хакасского заповедника, О. О. Порабейкиной был использован вегетационный индекс NDVI с расчетом карт значений, полученных в результате обработки материалов мультиспектральной съемки КА Landsat 8. Собранные данные позволили создать картографическую модель, систематизирующую информацию о топологическом составе фитоценоза и его пространственной организации [105].

В работе М. Уртнасан «Пастбищная дигрессия в степях северной части центральной Монголии» (2015) одним из основных инструментов оценки состояния травянистой растительности пастбищ являлся индекс NDVI, рассчитанный на основе материалов космосъемки КА MODIS/Terra с

пространственным разрешением 250 метров на пиксель. При этом, в ходе исследования выполнялись натурные геоботанические исследования с подсчетом количества надземной фитомассы на учетных площадках 1 м<sup>2</sup>. В данном исследовании не проводилось оценки взаимосвязи количества надземной фитомассы со значениями индекса NDVI. Однако карты индекса NDVI позволили выполнить классификацию территории пастбищ по уровню развития дигрессии и выявить многолетнюю динамику изменений [133].

Применимость спектральных вегетационных индексов в качестве индикатора динамики состояния природных и антропогенных экосистем была оценена многими исследователями применительно к различным формам наземной растительности и в различных почвенно-климатических зонах. А. П. Гусев (2021) показал возможность использования вегетационных индексов как универсального инструмента оценки динамики развития надземной фитомассы природных и антропогенных систем, применив способ анализа серии материалов космосъемки КА Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI за период с 1984 по 2020 год с пространственным разрешением 30 метров на пиксель. Результаты данной работы свидетельствовали о том, что многолетняя динамика значений индекса NDVI характеризует качественные и количественные изменения растительного покрова изучаемой территории. Гусев отмечает взаимосвязь показаний вегетационных индексов со степенью антропогенного воздействия на растительный покров в части возможности их площадной и количественной оценки при наличии изменений в фитомассе и структуре растительности различных типов угодий [43, 44, 45].

Исходя из опыта исследований прочих авторов, проведенных в отношении различных типов растительности с использованием методов дистанционного мониторинга на основе мультиспектральной съемки, можно сделать вывод о том, что данный инструмент может использоваться для анализа пространственно-временной и количественной динамики надземной фитомассы травяных экосистем как антропогенного, так и природного

происхождения. Важной особенностью вегетационных спектральных индексов является относительность их значений. Для индекса NDVI существует возможный диапазон значений, который лежит в интервале от -1 до 1. При этом эмпирический опыт измерений индекса на различных участках земной поверхности показал, что для растительного покрова различной степени плотности NDVI чаще всего принимает значения от 0,3 до 0,9. Чем более развита зеленая биомасса, тем выше значение индекса [152, 153, 157, 160, 161, 165, 166, 170]. Данная закономерность позволяет давать относительную характеристику состояния растительного покрова, но не позволяет перейти напрямую к абсолютным величинам количества надземной фитомассы на единицу площади. Например, изменение значений индекса в серии снимков на месячном интервале не может дать информации о том, каков был прирост биомассы в  $\text{кг}/\text{м}^2$  или  $\text{т}/\text{га}$ . Для приведения относительных величин вегетационных индексов к абсолютным количественным характеристикам надземной фитомассы используются математические модели, основанные на корреляции пар значений индекс/биомасса в калибровочных выборках. Данный принцип широко применяется при решении задач прогнозирования урожайности посевов сельскохозяйственных культур. Закономерность таких моделей для культур сплошного сева (колосовые зерновые) математически описывается уравнением регрессии [31, 145, 154].

Обобщая результаты теоретического анализа подходов к изучению биологического ресурса луговых травяных сообществ, можно сделать следующие выводы:

- 1) К настоящему времени накоплен некоторый объем сведений о составе и свойствах природных лугов как ценных кормовых угодий в различных регионах страны и в том числе Воронежской области на основе исследований, проводимых преимущественно во второй половине XX века [93, 94, 108].

- 2) Проведена оценка продуктивности лугов как элемента травяных экосистем на уровне представительных участков нескольких макрорегионов России и СНГ с использованием прямых методов учета [22, 28, 32, 128].
- 3) В последние десятилетия выполнен ряд исследований, содержащих, в том числе, сведения о продуктивности и функциональном состоянии травяных фитоценозов природных угодий, среди которых значительная часть работ охватывает отдельные районы областей Центрального Черноземья и прочих регионов [1, 2, 24, 25, 26, 47, 48, 114, 148, 150].
- 4) Среди методов оценки продуктивности и динамики надземной фитомассы травяных систем в ранее проведенных исследованиях преобладает способ замера срезанной массы на учетных площадках площадью от 0,25 м<sup>2</sup> до 1 м<sup>2</sup> [22, 24, 28, 32, 124].
- 5) Методы дистанционного мониторинга растительной биомассы лугов как инструмент оценки динамики продуктивности и пространственной неоднородности встречаются в исследованиях отдельных авторов преимущественно в приложении к пастбищам материковых лугов или луговых степей регионов Нечерноземья и Средней Азии. При этом практически отсутствуют работы, в которых применялось бы сопоставление результатов прямых и дистанционных измерений применительно к луговым территориям естественных травяных экосистем, которые являются потенциально значимыми для сельскохозяйственного использования [36, 46, 50, 54, 60, 63, 64, 65, 85, 105, 107, 133].
- 6) В литературе отсутствуют сведения о современных системных исследованиях хозяйственно-ценных фитоценозов пойменных лугов Воронежской области, где учитывались бы различия природно-климатических зон региона и использовался бы подход оценки

состояния и свойств луговой растительности с позиции значимого биологического ресурса.

Основываясь на приведенных выше фактах, становится очевидной необходимость организации исследований луговых фитоценозов региона с применением комплекса современных методов мониторинга и учета, результаты которых могут быть использованы для выработки подходов рационального сельскохозяйственного использования биологического ресурса природных ассоциаций луговых растений, поддержания видового разнообразия, обеспечения их устойчивого воспроизводства и снижения рисков деградации растительных сообществ при антропогенном воздействии.

## **2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **2.1 Объекты исследования**

Изучаемыми объектами в данном исследовании выступали четыре участка пойменных лугов, расположенные в разных районах Воронежской области.

Участок № 1 расположен в Семилукском районе Воронежской области в 350 метрах к западу от сельского поселения Сапруновка. В границах изучаемой зоны участок имеет площадь 8,94 га с максимальными линейными размерами 1500 x 350 метров. Вытянут в меридиональном направлении, приурочен к руслу малого ручья, являющегося притоком р. Ольшанка.

Участок № 2 находится в Терновском районе Воронежской области на удалении около 1300 метров к северо-востоку от границы населенного пункта Козловка. Изучаемая площадь составляет 4,58 га. Имеет максимальные размеры 330 x 215 метров и слегка вытянут в направлении с северо-запада на юго-восток вдоль русла р. Елань.

Участок № 3 расположен в Богучарском районе Воронежской области в 250 метрах к югу от села Данцевка, площадью 7,64 га. Слегка вытянут в широтном направлении вдоль русла р. Богучарка, имеет максимальные размеры 420 x 225 метров.

Участок № 4 находится в Таловском районе Воронежской области примерно в 820 метрах к юго-западу от поселка Коминтерн. Площадь участка составляет 2,34 га. Имеет максимальные размеры 210 x 150 метров. С севера, запада и юга примыкает к руслу р. Сухая Чигла.

Координатная привязка изучаемых территорий дана в таблице 2. Карты-схемы участков приведены в приложении 1.

Таблица 2 – Координаты, площадь и географическое расположение изучаемых объектов

Наименование	Площадь, га	Географическое расположение	Координаты центров (широта, долгота) в системе проекции WGS84
Участок № 1	8,94	Семилуцкий р-н, с. Сапруновка	51.86152, 38.60589
Участок № 2	4,58	Терновский р-н, с. Козловка	51.68642, 41.33098
Участок № 3	7,64	Богучарский р-н, с. Данцевка	49.90292, 40.25707
Участок № 4	2,34	Таловский р-н, с. Коминтерн	51.11601, 40.63153

## 2.2 Характеристика почвенно-климатических условий

Климат Воронежской области относится к умеренно-континентальному типу с выраженной сезонностью. Многолетний режим погоды региона формируется под влиянием воздушных масс, приходящих преимущественно с западного направления. Для территории области характерна холодная зима с со средней температурой января  $-8,2^{\circ}\text{C}$  и формированием устойчивого снежного покрова. Лето чаще жаркое с высокой вероятностью возникновения засух в южных районах. Средняя температура июля составляет  $+20,8^{\circ}\text{C}$ . Смена сезонов сопровождается постепенным изменением температур. Средняя продолжительность периода с активными температурами  $>+5^{\circ}\text{C}$  в Воронежской области составляет 185 суток [9, 13, 69, 70, 86, 135, 149].

Гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) в границах региона принимает значения от 0,82 в южных районах до 1,12 на северо-западной

оконечности и имеет широтный характер распределения. Изолиния ГТК = 1 проходит вблизи населенных пунктов Острогожск–Лиски–Бобров–Таловая–Борисоглебск и соответствует условному разделению территории области на лесостепную и степную зоны. Максимальное количество осадков в вегетационный период наблюдается в северо-западной части региона и составляет 325-327 мм для Семилукского и Рамонского районов [12, 13].

Объекты исследования расположены в нескольких районах области и отличаются по многолетнему режиму погоды. На рисунках 1 и 2 приведены карты распределения основных климатических характеристик региона (среднегодовой температуры воздуха, суммы осадков и гидротермического коэффициента).

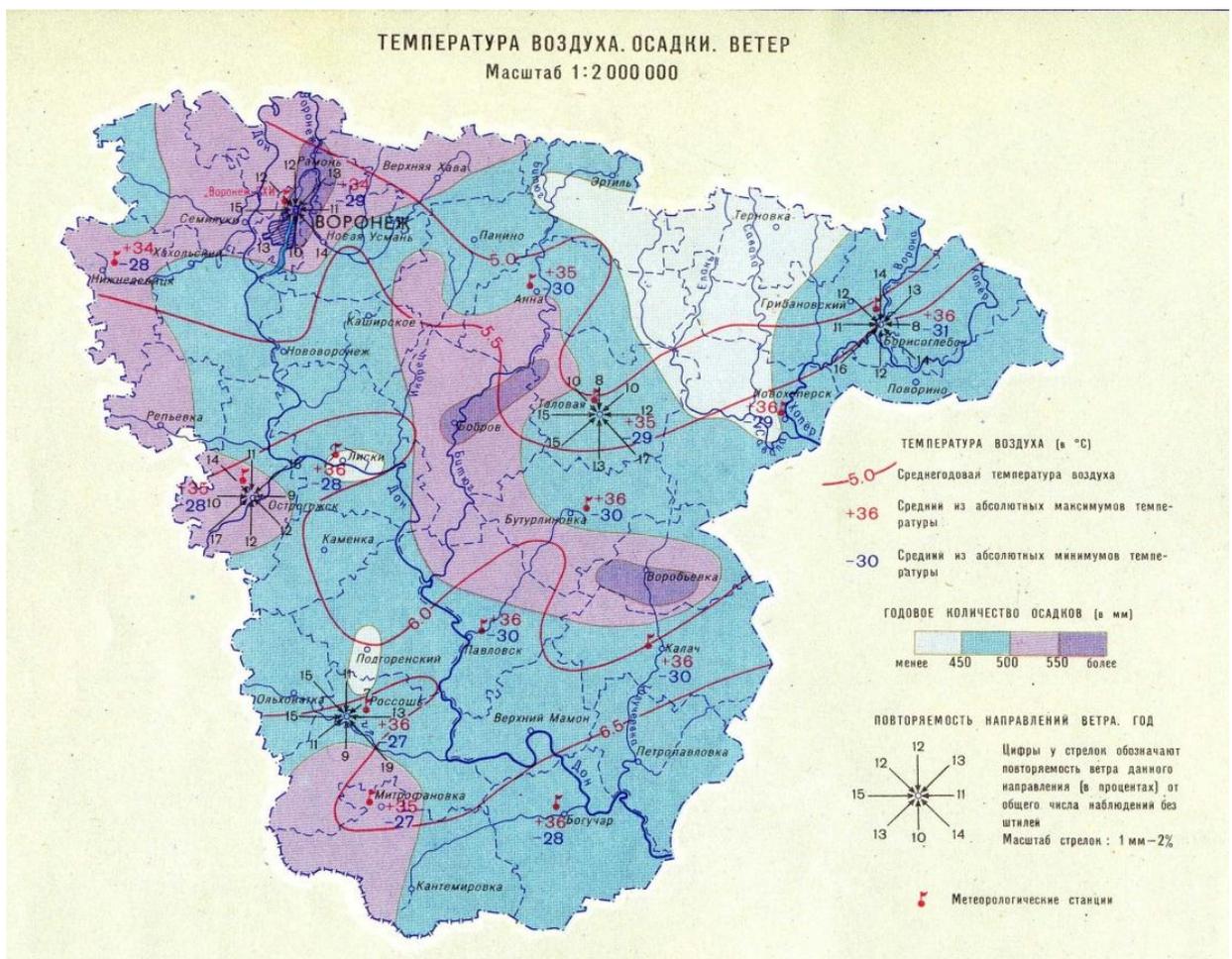


Рисунок 1 – Климатическая карта Воронежской области

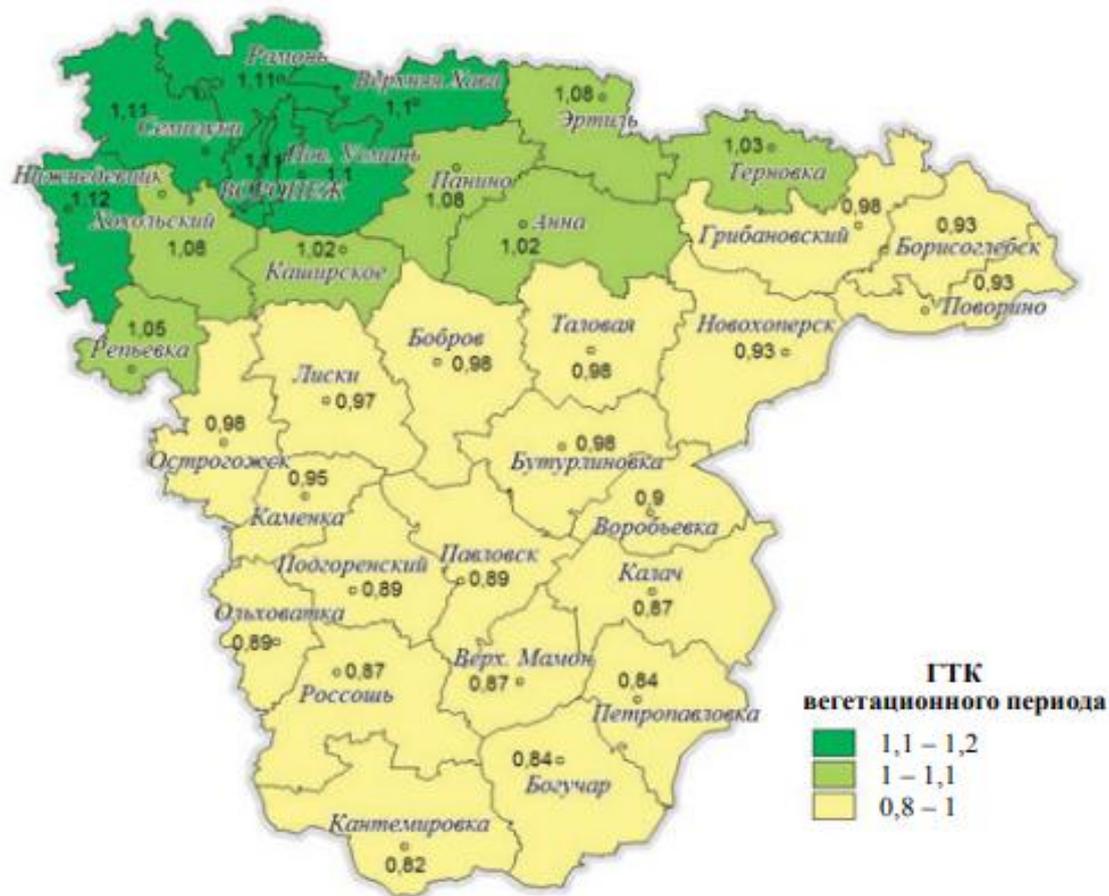


Рисунок 2 – Гидротермический коэффициент вегетационного периода [86]

Основным критерием выбора при поиске объектов исследования, отвечающих целям и задачам данной работы, было нахождение луговых участков в представительных условиях, характеризующих разнообразие природно-климатических зон Воронежской области. Исходя из этого, были определены следующие районы исследования: Семилукский, Терновский, Таловский и Богучарский.

Семилукский район относится к зоне с максимальным гидротермическим коэффициентом вегетационного периода (ГТК = 1,11) и находится на северо-западе в лесостепной части Воронежской области. Среднегодовая температура района составляет от +5,0°C до +5,5°C. За год выпадает от 500 до 550 мм осадков.

Терновский район расположен в северной и северо-восточной части области. Относится к лесостепной зоне. Для вегетационного периода ГТК =

1,03. Годовое количество осадков составляет менее 450 мм. Среднегодовые температуры лежат в интервале от  $+4,5^{\circ}\text{C}$  до  $+5,0^{\circ}\text{C}$ .

Таловский район находится в центральной части региона и относится к переходной зоне между лесостепью и степью. ГТК вегетационного периода 0,98. Для района характерно среднегодовое количество осадков от 450 до 500 мм и среднегодовые температуры от  $+5,0^{\circ}\text{C}$  до  $+5,5^{\circ}\text{C}$ .

Богучарский район, находясь на южной конечности Воронежской области, относится к степной зоне. В вегетационный период ГТК = 0,84, что позволяет отнести район к засушливой территории. Среднегодовые температуры лежат в пределах изотерм от  $+6,5^{\circ}\text{C}$  до  $+7,0^{\circ}\text{C}$  при среднегодовом количестве осадков 450 – 500 мм.

Таким образом, расположение объектов исследования позволяет охватить типичные зоны с относительно высоким увлажнением и умеренными температурами (Семилукский район), низким увлажнением и низкими температурами (Терновский район), переходную зону со средним увлажнением и умеренными температурами (Таловский район) и засушливую зону со средним увлажнением и высокими температурами (Богучарский район). В таблице 3 приведена сравнительная характеристика климатических условий для районов расположения объектов исследования.

Таблица 3 – Климатическая характеристика районов расположения объектов исследования [86]

Район	ГТК (за вегетационный период)	$\Sigma$ осадков среднегодовая, мм	T среднегодовая, $^{\circ}\text{C}$
Семилукский	1,11	500-550	$+5,0\dots+5,5$
Терновский	1,03	400-450	$+4,5\dots+5,0$
Таловский	0,98	450-500	$+5,0\dots+5,5$
Богучарский	0,84	450-500	$+6,5\dots+7,0$

Почвенный покров речных пойм Воронежской области представлен несколькими типами: аллювиальные дерновые насыщенные, аллювиальные луговые насыщенные, аллювиальные лугово-болотные, аллювиальные болотные перегнойно-глеевые, аллювиальные болотные иловато-торфяные почвы. В зависимости от наличия сопутствующих почвенных процессов, почвы пойм разделяются на уровне подтипа, рода, вида. В условиях периодического сезонного затопления пойменных лугов и близкого залегания грунтовых вод, определяющих гидроморфизм данной группы почв, возможно присутствие солонцеватости и засоления. При этом в зависимости от локальной специфики развития почв и динамики гидрологических условий, отмечается присутствие автоморфных изменений, что сопровождается так называемым остепнением лугов. Нередко встречаются признаки вторичных почвенных процессов, выражающихся в присутствии карбонатов, образующихся в результате эрозии водораздельных пространств со смывом почвенного вещества в область речной поймы [18, 19, 20, 21, 104, 146, 147]. По данным Г. В. Добровольского для аллювиальных луговых почв характерно содержание гумуса в диапазоне от 4 до 12% с повышенным содержанием фракций, связанных с полуторными окислами. Характерно наличие глинистых железистых минералов и аллофаноидов. Отмечается обеспеченность минеральным азотом на уровне 20 – 30 мг/кг и недостаточная обеспеченность подвижным фосфором при высоком его валовом содержании. Емкость катионного обмена чаще всего высокая и достигает 40 – 50 мг-экв/100г [16].

### **2.3 Геоморфология фитоценозов**

Воронежская область расположена в границах нескольких геоморфологических образований. Северо-восточная и восточная часть региона находится на южной окраине Окско-Донской низменности. Западная часть, начиная от границы русла р. Дон, относится к Средне-Русской возвышенности. Также на северо-западе области выделяется купное

образование, возникшее в результате поднятия девонского кристаллического фундамента – Воронежская антеклиза. На юго-востоке региона начинается Калачская возвышенность, переходящая в соседнюю Волгоградскую область [42, 136, 141].

Объекты исследования расположены в разных физико-географических районах. Семилукский и Богучарский районы относятся к территории Средне-Русской возвышенности. При этом Семилукский район также расположен в границах Воронежской антеклизы. Терновский район находится в пределах Окско-Донской низменности. Таловский район находится на границе между Окско-Донской низменностью и Калачской возвышенностью [17, 39].

Мезорельеф мест расположения объектов исследования имеет схожие черты в части типового строения речной поймы. Отличия наблюдаются в выраженности надпойменных террас. Так, для пойменных лугов Семилукского и Терновского районов характерно наличие не больших речных пойм приуроченных к руслам малых рек с заметными и близко расположенными первыми надпойменными террасами. Максимальная высота первой террасы над уровнем поймы отмечена в Семилукском районе. На рисунках 3 – 6 показаны формы мезорельефа в зоне расположения объектов исследования.

Луговой участок, расположенный в Таловском районе, имеет менее выраженный переход от поймы к первой террасе с плавным нарастанием высоты в юго-восточном направлении. В Богучарском районе отмечается значительная ширина поймы с последующим заметным переходом в первую надпойменную террасу к югу.



Рисунок 3 – Форма рельефа близ исследуемого луга (вид с первой надпойменной террасы), Терновский район Воронежской области.



Рисунок 4 – Пойменный луг и смежные формы рельефа (вид с первой надпойменной террасы), Семилукский район Воронежской области



Рисунок 5 – Пойменный луг близ русла реки (вид от уровня поймы),  
Таловский район Воронежской области



Рисунок 6 – Широкая речная пойма со слабо выраженным переходом к  
первой террасе, Богучарский район Воронежской области

## 2.4 Растительный потенциал территорий

Видовой состав растительных сообществ исследуемых объектов является типичным для пойменных лугов региона. Наблюдаются отличия на уровне районов, что обусловлено значительным пространственным удалением объектов исследования – расстояние между северными и южными границами зоны исследований составляет более 200 км.

При выборе объектов исследования, руководствовались принципом поиска участков пойменных лугов с отсутствием явных признаков окультуривания (подсева трав, внесения удобрений). Все исследуемые луга используются в хозяйственной деятельности человека. Преобладающий вид использования – сенокосение. Было установлено отсутствие окультуренности изучаемых луговых участков, расположенных во всех районах области. За период исследований ни на одном из исследуемых участков не выполнялось никаких агротехнологических операций кроме скашивания травяной массы. При анализе собранной на местном уровне информации, также не было найдено сведений о каких-либо искусственных улучшениях лугов. В связи с этим, все исследуемые объекты рассматриваются в данной работе как территории природных фитоценозов.

Луг Семилукского района характеризуется наибольшим видовым разнообразием и представлен сообществами злаково-разнотравной растительности с преобладанием ассоциаций пырея ползучего, видами овсяницы. Чина луговая является основным представителем бобовых. Из видов с низкой хозяйственной ценностью встречается одуванчик лекарственный, василек луговой, щавель конский.

В Терновском районе на исследуемом лугу отмечено преобладание пырея ползучего и мятлика лугового. Присутствие бобовых в виде чины луговой и мышиного горошка незначительно. Разнотравные виды с низкой хозяйственной ценностью представлены слабо. Присутствуют микрогруппировки одуванчика лекарственного и щавеля конского.

Луговой участок Таловского района характеризуется обильным присутствием пырея ползучего, мятлика лугового. Вблизи русла реки встречается щавель конский. На удалении от воды распространен одуванчик лекарственный. Бобовые представлены фрагментарно небольшими ассоциациями чины луговой.

В Богучарском районе в пределах изучаемого луга отмечается повсеместное преобладание овсяницы луговой. Встречаются пятна пырея ползучего. Присутствует куртинами щавель конский.

В целом изучаемые объекты исследования имеют обширный сельскохозяйственный потенциал в качестве кормовой базы для сельскохозяйственных животных в аграрном производстве.

Для оценки пропорционального вклада в формирование хозяйственно-ценной фитомассы различных видов луговых растений, был произведен расчет долей массы надземных частей растений в предукосный период для каждого исследуемого участка. В таблице 4 приведены сведения о процентном соотношении надземной фитомассы каждого вида к моменту первого сезонного укоса.

Таблица 4 – Соотношение массы надземных частей растений лугов

Район	Преобладающие виды растений	Доля в структуре надземной фитомассы предукосного периода
Семилуковский	Пырей ползучий ( <i>Elytrigia repens</i> L.)	45%
	Овсяница луговая ( <i>Festuca pratensis</i> Huds.)	30%
	Щавель конский ( <i>Rumex confertus</i> Willd.)	8%

	Чина луговая ( <i>Lathyrus pratensis</i> L.), Одуванчик лекарственный ( <i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.), Василек луговой ( <i>Centaurea jacea</i> L.)	17%
Терновский	Пырей ползучий ( <i>Elytrigia repens</i> L.)	42%
	Мятлик луговой ( <i>Poa pratensis</i> L.)	38%
	Щавель конский ( <i>Rumex confertus</i> Willd.)	5%
	Чина луговая ( <i>Lathyrus pratensis</i> L.), Мышиный горошек ( <i>Vicia cracca</i> L.), Одуванчик лекарственный ( <i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.)	15%
Таловский	Пырей ползучий ( <i>Elytrigia repens</i> L.)	60%
	Мятлик луговой ( <i>Poa pratensis</i> L.)	32%
	Чина луговая ( <i>Lathyrus pratensis</i> L.), Щавель конский ( <i>Rumex confertus</i> Willd.)	8%
Богучарский	Овсяница луговая ( <i>Festuca pratensis</i> Huds.)	80%
	Пырей ползучий ( <i>Elytrigia repens</i> L.)	11%
	Щавель конский ( <i>Rumex confertus</i> Willd.), разнотравье	9%

## 2.5 Методы мониторинга пространственно-временной дифференциации угодий лугово-пастбищных биоценозов

### 2.5.1 Методы мониторинга и учета состояния

Натурные исследования, проводимые в рамках работы, включали в себя ряд измерений, необходимых для оценки продуктивности надземной

фитомассы лугов. Для каждого изучаемого объекта были выполнены следующие действия:

**Выделение границ объекта для получения представительной площади.** Границы были определены на основе визуальной оценки протяженности речной поймы в условиях однородного рельефа и характерного растительного покрова, а также с использованием анализа ретроспективной космосъемки для проверки временной стабильности границ и формы участка изучаемого луга. Площадь участка в выделенных границах была вычислена как площадь полигональной фигуры в плане, полученной на основе записи GPS координат. Для определения координат границы лугового участка в полевых условиях использовался GPS-приемник мобильного устройства Samsung Note 9 с программным обеспечением «АгроСигнал.Картирование». Постобработка полевых измерений выполнялась в программном обеспечении «Quantum GIS» [52].

**Определение видового состава.** Для оценки видового состава луга в первый год исследования (2021) был использован метод учетных площадок с площадью  $1 \text{ м}^2$ , на которых производилась идентификация произрастающих видов травянистой растительности в соответствии с рекомендациями В. С. Ипатова (2008) [59]. Определение видовой принадлежности растений выполнялось с использованием полевого определителя растений [8, 66, 84, 142].

**Измерение количества надземной фитомассы.** В ходе исследований была выполнена серия измерений количества надземной фитомассы лугов в различные периоды вегетационного сезона. Для среза растений с единицы площади использовалась рамка  $0,25 \text{ м}^2$ . Срез производился на высоте 5-7 см от поверхности почвы, что соответствует способу механизированного скашивания наиболее распространенными роторными косилками при ровной поверхности участка. Полученная травяная масса взвешивалась при естественной влажности. Измерения на каждом исследуемом участке проводились по диагональной линии в 5-7 точках в каждый день полевого

обследования с последующим расчетом среднего значения количества надземной фитомассы в  $\text{кг}/\text{м}^2$  на соответствующую дату [56, 59]. Для выбора периода измерений использовались следующие критерии: сухая, преимущественно безоблачная погода, отсутствие интенсивных осадков в прошлые сутки. Взвешивание срезанной фитомассы производилось с помощью электронных весов, имеющих дискретность измерения 5 г для диапазона от 0 до 10 кг. Для обеспечения единства, воспроизводимости и повторяемости измерений выполнялась калибровка весов с помощью поверенной гири массой 200 г (класс E1) в соответствии с ГОСТ Р 53228-2008 [41]. На рисунке 7 показан процесс измерения количества фитомассы в рамке перед началом среза растений.



Рисунок 7 – Подготовка к срезу травостоя в учетной рамке при определении количества надземной фитомассы

Дистанционные исследования выполнялись на основе материалов орбитальной мультиспектральной космосъемки. В качестве источника данных использовались многоканальные снимки космического аппарата

Sentinel-2 категории level 1C с пространственным разрешением 10 метров на пиксель [156, 162]. Периодичность съемки территории составила 2-3 дня, что обусловлено параметрами орбиты космического аппарата. Оценка пространственной и временной динамики развития надземной фитомассы лугов выполнялась с применением нормализованного разностного вегетационного спектрального индекса NDVI, рассчитываемого по формуле:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}, \quad (1)$$

где

**NDVI** – значение индекса,

**B8** – интенсивность ближнего инфракрасного канала (842 нм),

**B4** – интенсивность красного канала (665 нм).

Обработка материалов космосъемки и расчет индекса NDVI выполнялась с использованием программного обеспечения «АгроСигнал» и «Quantum GIS» [52, 117]. Для визуализации пространственно-временной дифференциации значений индекса были построены карты с цветокодировкой диапазонов. Для оценки временной динамики индекса для каждого объекта исследований были рассчитаны средние значения NDVI на дату съемки, которые впоследствии сравнивались со средними значениями измерений количества надземной фитомассы. На рисунке 8 показан интерфейс программы «АгроСигнал» при работе с картой индекса NDVI.



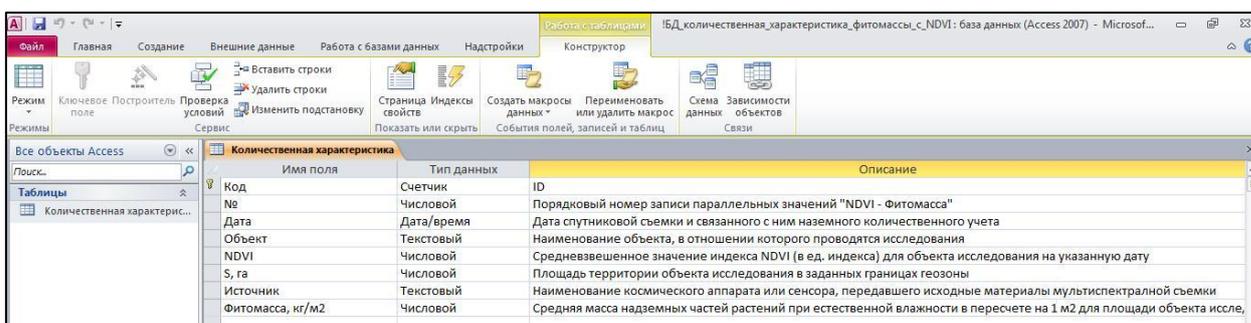
Рисунок 8 – Построение карты вегетационного индекса NDVI для исследуемого объекта за 28.04.2021 (Терновский район Воронежской области)

## 2.5.2 Методы анализа результатов мониторинга

Результаты натуральных измерений количества надземной фитомассы были систематизированы в хронологическом порядке для каждого объекта исследования. Результаты дистанционных измерений также были хронологически систематизированы в виде средних значений индекса NDVI для каждого объекта на дату съемки.

Для сопоставления и анализа взаимосвязей выборок натуральных и дистанционных измерений была разработана специальная структура базы данных (рисунок 9), впоследствии зарегистрирована автором (свидетельство о госрегистрации №2024621868 от 02.05.2024) [116].

Проверка достоверности взаимосвязи парных значений была выполнена общепринятым статистическим методом, используемым в биологических исследованиях, с расчетом критерия Вилкоксона для уровня значимости  $p=0,05$  [54, 58,80].



Имя поля	Тип данных	Описание
Код	Счетчик	ID
№	Числовой	Порядковый номер записи параллельных значений "NDVI - Фитомасса"
Дата	Дата/время	Дата спутниковой съемки и связанного с ним наземного количественного учета
Объект	Текстовый	Наименование объекта, в отношении которого проводятся исследования
NDVI	Числовой	Средневзвешенное значение индекса NDVI (в ед. индекса) для объекта исследования на указанную дату
S, га	Числовой	Площадь территории объекта исследования в заданных границах геозоны
Источник	Текстовый	Наименование космического аппарата или сенсора, передавшего исходные материалы мультиспектральной съемки
Фитомасса, кг/м2	Числовой	Средняя масса надземных частей растений при естественной влажности в пересчете на 1 м2 для площади объекта иссле...

Рисунок 9 – Структура базы данных для анализа результатов натуральных и дистанционных измерений, полученных в ходе исследования [116]

Методы исследования были выбраны на основании проведенного анализа подходов и способов мониторинга пространственно-временной динамики надземной фитомассы травяных растительных сообществ. Применение комбинации натуральных обследований с прямым измерением количества фитомассы на единицу площади в параллели с дистанционной мультиспектральной съемкой было обусловлено задачами исследования и направлено на выявление характера взаимосвязи между методами, а также повышение представительности и пространственного охвата изучаемых территорий.

### **3 РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, МОНИТОРИНГ И ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЛУГОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ**

#### **3.1 Оценка состояния и анализ биологического ресурса луговых фитоценозов по результатам натурных исследований**

В ходе исследования, выполнявшегося в период вегетационных сезонов 2021 - 2023 годов, для каждого изучаемого объекта была выполнена серия измерений, включавших в себя разметку учетных площадок по большой диагонали участка пойменного луга и последующий учет количества надземной фитомассы, характеризующей продукционную способность растительного сообщества в данных условиях. В течение всего срока наблюдений было осуществлено 48 полевых выездов. В таблице 5 показана история сроков наблюдений за каждый год работы. Основная часть натурных наблюдений проводилась в период со 2й декады апреля по середину июня для максимального охвата времени интенсивного прироста надземной фитомассы и обнаружения пика накопления травостоя перед первым укосом лугов, использующихся в сельскохозяйственной деятельности в качестве природного биологического ресурса.

Таблица 5 – Информация о времени полевых выездов для исследуемых объектов

Район расположения объекта исследования	Дата выполнения наблюдений
Семилукский	25.04.2021
	17.05.2021
	15.06.2021
	20.06.2021
	28.09.2021
	01.05.2022
	08.05.2022

	23.06.2022
	24.08.2022
	16.04.2023
	28.04.2023
	19.05.2023
	05.06.2023
	11.08.2023
	23.09.2023
Терновский	26.04.2021
	25.05.2021
	09.06.2021
	15.09.2021
	30.04.2022
	14.05.2022
	05.06.2022
	28.04.2023
	03.05.2023
	02.06.2023
	27.07.2023
Богучарский	24.04.2021
	14.05.2021
	14.06.2021
	24.04.2022
	23.05.2022
	19.06.2022
	12.07.2022
	13.05.2023
	04.06.2023
	23.06.2023
Таловский	30.04.2021
	18.05.2021
	08.07.2021
	15.04.2022
	24.05.2022

	07.07.2022
	19.09.2022
	09.04.2023
	15.05.2023
	19.06.2023
	25.07.2023
	26.08.2023

Для определения среднего значения количества надземной фитомассы на единицу площади луга, при каждом полевом выезде было выполнен учет массы растений в рамке  $0,25\text{м}^2$  при естественной влажности на 5 – 7 точках, расположенных по диагонали луга с последующим усреднением измеренных величин. При повторных обследованиях расположение точек учета выбиралось в соответствии с ранее намеченной диагональной линией, ориентируясь на показания GPS приемника.



Рисунок 10 – Процесс полевого обследования (Таловский район, Воронежская область)

В приложении 2 приведены результаты измерений количества надземной фитомассы на каждую дату исследования. Для оценки продукционной способности было проведено сравнение максимальных зафиксированных значений надземной фитомассы на единицу площади в течение сезона и рассчитана среднесуточная скорость прироста биомассы за период апрель-май для каждого года исследования.



Рисунок 11 – Взвешивание срезанной надземной фитомассы (Семилукский район, Воронежская область)

На рисунке 12 показана диаграмма зафиксированных пиковых значений количества надземной фитомассы по каждому объекту исследования перед первым укосом в каждый год исследования.

В результате усреднения значений годовых максимумов надземной фитомассы был построен рейтинг продуктивности лугов. В таблице 6

приведена группировка исследуемых лугов в порядке убывания продукционного потенциала.

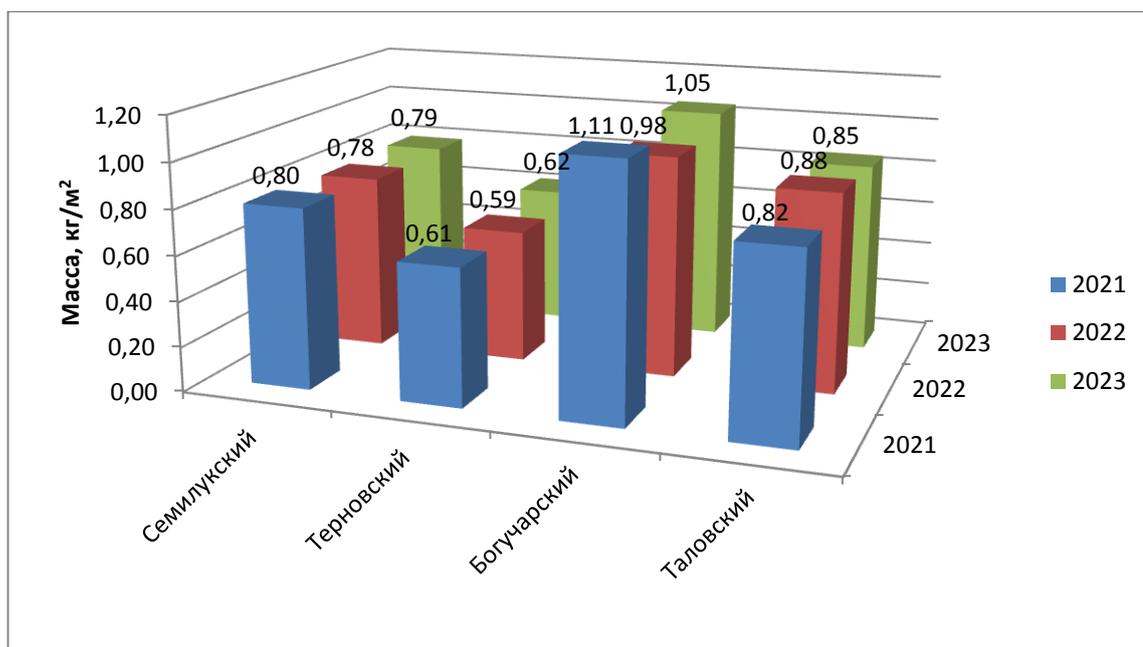


Рисунок 12 – Диаграмма пиковых значений количества надземной фитомассы в  $\text{кг}/\text{м}^2$  по районам расположения объектов исследования за 2021 – 2023 год.

Таблица 6 – Группировка исследуемых лугов по максимальной продуктивности надземной фитомассы,  $\text{кг}/\text{м}^2$

Позиция в рейтинге	Район	2021	2022	2023	Среднее за 3 года
1	Богучарский	1,11	0,98	1,05	1,05
2	Таловский	0,82	0,88	0,85	0,85
3	Семилукский	0,80	0,78	0,79	0,79
4	Терновский	0,61	0,59	0,62	0,61

Различия максимумов надземной фитомассы для пойменных лугов, расположенных в различных районах Воронежской области, можно связать с закономерностями распределения среднегодовых сумм активных температур в регионе. На рисунке 13 изображена карта диапазонов активных температур ( $t > 10^\circ\text{C}$ ) для административных районов области [86].



Таблица 7 –Максимальные значения количества надземной фитомассы (кг/м<sup>2</sup>) в сравнении со среднеголетними суммами активных температур

Район	Среднее за 3 года	$\sum t > 10^{\circ}\text{C}$ за год
Богучарский	1,05	2927
Таловский	0,85	2784
Семилукский	0,79	2670
Терновский	0,61	2734
	<i>r</i>	0,78

Учитывая, что в ходе исследования продукционной способности луговых растительных сообществ максимальное количество измерений количества надземной фитомассы проводилось в период с апреля по июнь, следует предположить, что причиной отсутствия высокой корреляции с годовой суммой активных температур может являться преобладающее влияние характера метеоусловий в весенний период, когда происходит наиболее интенсивный прирост вегетативной массы, формирующий травостой для первого укоса.

В ходе исследования отсутствовала возможность получения достоверной информации о ежесуточных осадках и температурах для мест расположения изучаемых лугов, что связано с особенностями расположения и функционирования метеостанций, передающих информацию в общедоступные сервисы в сети Интернет. В связи с этим, для проверки гипотезы влияния температурного режима апреля и мая на продукционную способность растительного сообщества пойменного луга, был выполнен анализ взаимосвязи между суммами активных температур за период с 01 апреля по 31 мая каждого года исследования и максимальными значениями количества надземной фитомассы лугов. Метеорологическая информация была получена через веб-сервис «OpenWeather» для места расположения метеостанции на территории опытного поля ФГБОУ ВО «Воронежский ГАУ им. императора Петра I» [33]. На основании выборки среднесуточных

температур за апрель и май 2021, 2022 и 2023 года были рассчитаны суммы активных температур за указанный период. В таблице 8 показаны значения суммы активных температур за апрель – май в каждый год исследования в сопоставлении с пиками надземной фитомассы для исследуемых лугов.

Таблица 8 – Сопоставление пиковых значений надземной фитомассы лугов с суммами активных температур в период апрель – май для каждого года исследования

Максимумы фитомассы по районам	2021	2022	2023
Семилукский, кг/м <sup>2</sup>	0,80	0,78	0,79
Терновский, кг/м <sup>2</sup>	0,61	0,59	0,62
Богучарский, кг/м <sup>2</sup>	1,11	0,98	1,05
Таловский, кг/м <sup>2</sup>	0,82	0,88	0,85
Сумма t>10°C (апрель - май)	571	482	565

В Воронежской области температурная зональность имеет выраженный широтный характер, что хорошо иллюстрируется картой на рисунке 13. В связи с этим, можно предположить, что для оценки влияния суммы активных температур в апреле – мае на продуктивность надземной фитомассы луговой растительности от начала весенней вегетации до достижения предубокового максимума, можно использовать данные метеонаблюдений и результаты подсчета количества надземной фитомассы для территорий, находящихся на одной широте. На рисунке 14 и 15 в качестве примера изображены гистограммы пиковых значений количества надземной фитомассы и суммы активных температур для исследуемых лугов Семилукского и Терновского районов. На обеих диаграммах отмечается взаимосвязь максимумов количества травянистой растительности на единицу площади с суммой активных температур за период исследования.

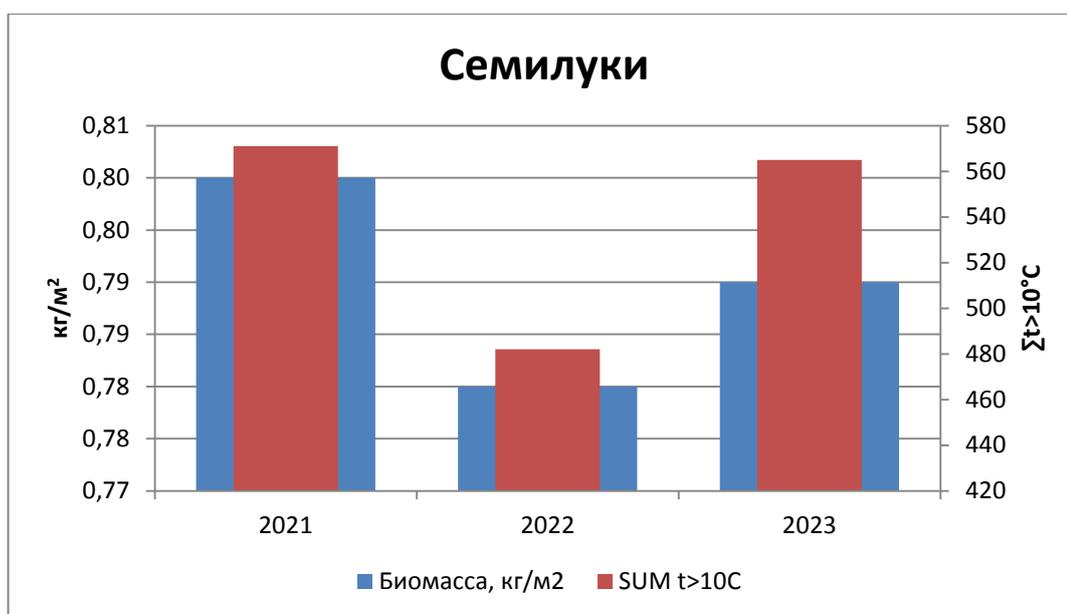


Рисунок 14 – Диаграмма трехлетней динамики пиковых значений надземной фитомассы луга (Семилукский район) в сопоставлении с суммами активных температур за период апрель – май

На фоне снижения суммы активных температур в апреле - мае 2022 года, для лугов Семилукского и Терновского районов отмечается эквивалентное снижение уровня пиковых значений надземной фитомассы.

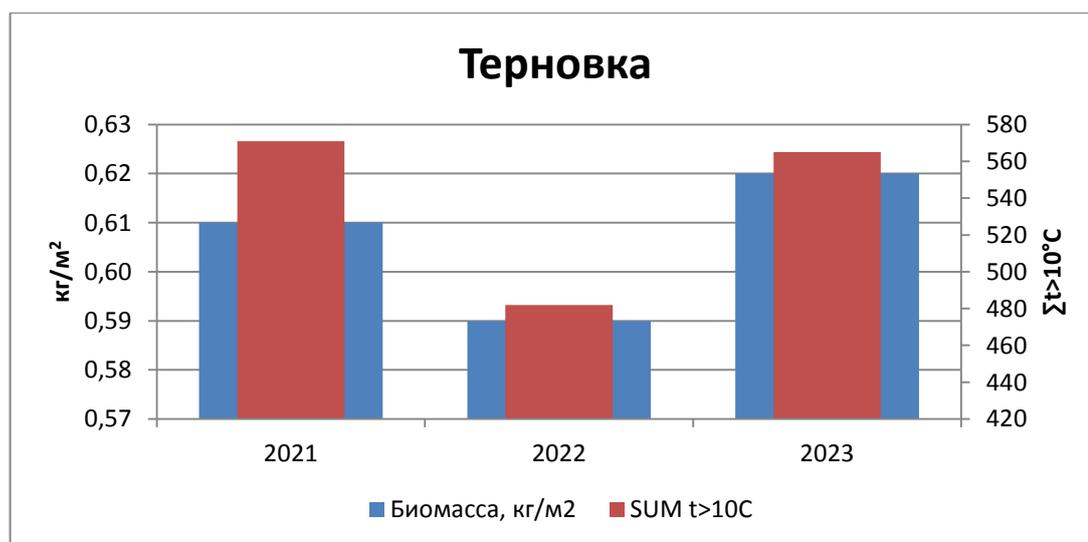


Рисунок 15 – Диаграмма трехлетней динамики пиковых значений надземной фитомассы луга (Терновский район) в сопоставлении с суммами активных температур за период апрель – май

Из исследований других авторов известно, что температура наряду с влагообеспеченностью является одним из ключевых факторов продуктивности фитоценоза [22, 24, 28, 96, 107, 132]. Учитывая, что пойменные луга формируются в условиях достаточного увлажнения за счет периодического весеннего затопления паводковыми водами и близкого залегания грунтовых вод, температуры апреля и мая могут играть определяющую роль в процессах первичной нетто-продукции лугового фитоценоза.

Используя результаты интервальных измерений количества надземной фитомассы в период с апреля по июнь, был выполнен расчет скорости суточного прироста для каждого года исследования. На рисунке 16 показаны результаты расчета среднесуточного прироста надземной фитомассы.

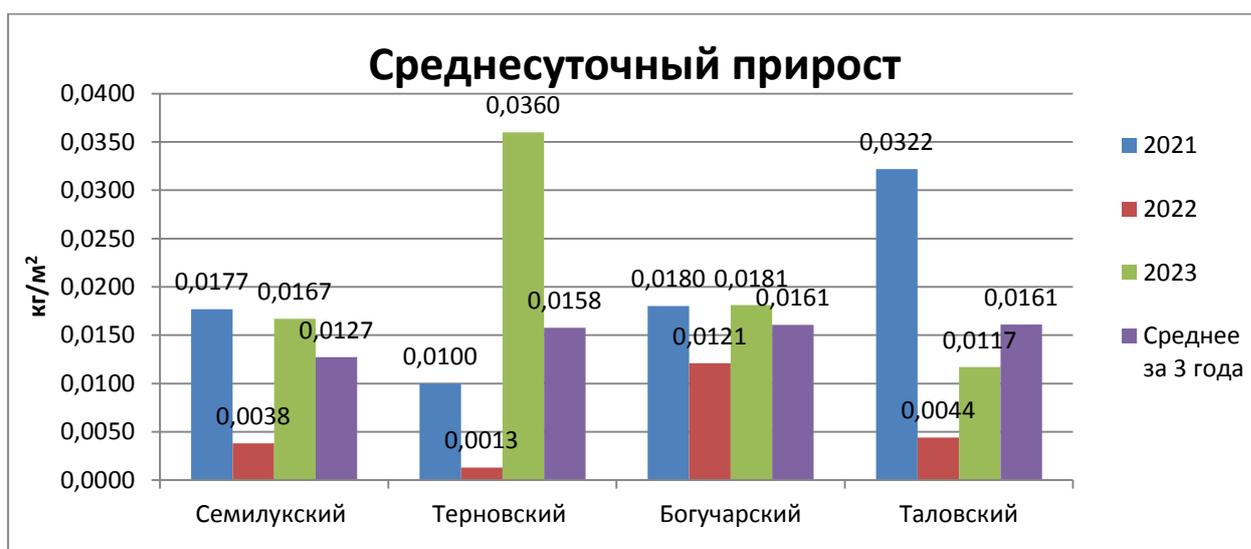


Рисунок 16 – Диаграмма среднесуточного прироста надземной фитомассы для исследуемых луговых территорий

Полученные данные среднесуточного прироста надземной фитомассы демонстрируют некоторую аналогию с закономерностью взаимосвязи между пиковыми значениями количества надземной фитомассы в части снижения скорости прироста в 2022 году, что соответствовало минимальной сумме активных температур в апреле – мае за весь период исследований. При этом,

ограниченность периода исследований в сочетании с динамичностью погодных условий весны не позволяют сделать однозначный вывод о преобладающем влиянии того или иного фактора без всеобъемлющего специализированного исследования. Поскольку выявление взаимосвязей между погодными условиями и скоростью прироста биомассы не являлось целью настоящей работы, а представляет собой сопутствующий результат, обнаруженные признаки возможных закономерностей могут быть использованы как предпосылка для продолжения исследований в будущем.

Если использовать показатель скорости среднесуточного прироста надземной фитомассы в качестве оценочного показателя продуктивности лугового фитоценоза, то рейтинг объектов исследования демонстрирует сходство с выявленной закономерностью рейтинга пиковых значений биомассы. В таблице 9 показано сопоставление значений среднесуточного прироста с максимумами количества надземной фитомассы.

Таблица 9 – Группировка луговых территорий по скорости среднесуточного прироста в сопоставлении с максимальными уровнями количества надземной фитомассы (кг/м<sup>2</sup>) (среднее за 2021 – 2023 годы)

Позиция	Район	Среднесуточный прирост	Максимум надземной фитомассы
1	Богучарский	0,0161	1,05
2	Таловский	0,0161	0,85
3	Терновский	0,0158	0,61
4	Семилукский	0,0127	0,79

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что наблюдается частичная взаимосвязь между скоростью прироста и пиковыми значениями надземной фитомассы для северных и центрального/южного районов. Так, более высокая скорость прироста в Таловском и Богучарском районах (0,0161 кг/м<sup>2</sup>/сутки в обоих случаях) соответствуют более высоким пиковым значениям количества надземной фитомассы для данных объектов

исследования (0,85 и 1,05 кг/м<sup>2</sup>, соответственно). В то время как среднесуточный прирост для Семилукского и Терновского районов (0,0127 и 0,0158 кг/м<sup>2</sup>/сутки, соответственно) соответствует более низким значениям максимального количества надземной фитомассы (0,79 и 0,61 кг/м<sup>2</sup>).

В результате анализа полученных значений были определены различия в продукционной способности луговых фитоценозов, расположенных в разных природно-климатических зонах Воронежской области (таблица 5). Наибольший прирост надземной фитомассы был обнаружен на пойменном лугу Богучарского района со среднемноголетним максимумом 1,05 кг/м<sup>2</sup>, а наименьший – в Терновском районе со значением среднемноголетнего максимума 0,61 кг/м<sup>2</sup>.

### **3.2 Результаты дистанционного мониторинга фитоценозов**

Для осуществления дистанционного мониторинга пространственно-временной динамики продуктивности луговых фитоценозов в период проведения исследования, было собрано и обработано 142 мультиспектральных спутниковых снимка, полученных в результате орбитальной съемки космическим аппаратом Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров/пиксель. Использовался уровень первичной обработки сцен L1C [162]. Определяющим условием для выбора мультиспектрального спутникового снимка и его дальнейшей обработки было соответствие двум главным критериям:

- Дата съемки, находящаяся во временном интервале среднемноголетних дат активной вегетации луговой растительности (с последней декады марта до конца октября).
- Облачное покрытие снимка в пределах границ геозон изучаемых луговых территорий не более 1%.

Количество спутниковых снимков, использовавшихся для выполнения расчетов, по районам расположения объектов исследования за весь период выполнения работы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Количество мультиспектральных спутниковых снимков для объектов исследования за период с 2021 по 2023 год

Район расположения изучаемого объекта	Семилукский	Терновский	Богучарский	Таловский
Количество снимков	25	27	39	51

Различия в количестве спутниковых снимков, удовлетворяющих критериям отбора, обусловлены частотой возникновения облачного покрова и атмосферных интерференций в проекции съемки над территорией изучаемых объектов в период выполнения исследования. Существует известная закономерность распространения и устойчивости различных типов облачного покрова над территориями России [23, 140]. Частота возникновения плотной облачности в весенне-летне-осенний период над Европейской частью РФ имеет широтный характер распределения с максимальной продолжительностью периодов облачного покрова на севере и минимальной на юге. Данной тенденцией, вероятно, определялось уменьшение количества безоблачных снимков для изучаемых территорий севера Воронежской области и их увеличение для центрального и южного районов.

В результате обработки выборки мультиспектральных снимков были получены цифровые карты распределения значений индекса NDVI для каждого объекта исследования на каждую дату съемки. На рисунке 17 представлен пример карты индекса NDVI со шкалой цветокодировки значений для одного из объектов исследования. Индикативные карты индекса NDVI для всех объектов исследования представлены в приложении 3.



Рисунок 17 – Пример цифровой карты распределения значений индекса NDVI (15.04.2022, Терновский район, Воронежская область)

Для оценки пространственного распределения надземной фитомассы лугов, использовались карты индекса NDVI при начале весенней вегетации, в момент активного прироста биомассы и в момент достижения пиковых значений.

***Пространственное распределение фитомассы лугов в начальный период вегетации.*** Анализ карт значений NDVI в начальный период вегетации за три года исследования показывает наличие общей закономерности распределения надземной фитомассы. На рисунках 18 – 21 показана неоднородность растительной биомассы пойменного луга в начале вегетации с датами съемки с 3 по 26 апреля. На картах луга Семилукского района отмечаются повышенные значения индекса NDVI в северной части участка и пониженные в южном расширении. На наш взгляд причиной подобного характера неоднородности может быть разница абсолютных высот между северной и южной окраиной луга и, как следствие, наличие слабовыраженного уклона поверхности. Аналогичная закономерность отмечена для луга, расположенного в Богучарском районе, где пониженные части поймы при большом разливе аккумулируют значительное количество

влаги и условия переувлажнения сохраняются более длительный период, чем на остальной территории луга.



Рисунок 18 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Семилукского района (дата съемки 26.04.2021)



Рисунок 19 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Терновского района (дата съемки 5.04.2023)



Рисунок 20 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Богучарского района (дата съемки 08.04.2022)



Рисунок 21 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Таловского района (дата съемки 08.04.2022)

При визуальных наблюдениях отмечено, что участки, имеющие при начале вегетации меньшие значения индекса NDVI, подвергаются большему затоплению разливающимися паводковыми водами, часто выходящими за пределы русла на значительное расстояние. В связи с этим, можно предположить, что некоторое отставание в начале вегетации на пониженной части луга имеет тесную взаимосвязь с явлением временного затопления и более длительного переувлажнения.

Условия мезо- и микрорельефа изучаемых лугов Таловского и Терновского районов имеют некоторое сходство – более высокое положение поймы относительно русла и отсутствие аккумулятивных форм в пределах границ участков. На картах индекса NDVI данная особенность отображается

в виде более равномерного распределения надземной фитомассы в весенний период.

***Пространственное распределение надземной фитомассы лугов в период интенсивного прироста.*** В начале мая, при начале активного набора зеленой биомассы растениями лугового фитоценоза, на всех изучаемых объектах происходит изменение характера пространственной дифференциации. На рисунках 22 – 25 приведены карты вегетационного индекса NDVI для лугов четырех районов Воронежской области в период активной вегетации конца апреля – начала мая.



Рисунок 22 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Семилукского района (дата съемки 06.05.2022)



Рисунок 23 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Терновского района (дата съемки 08.05.2023)



Рисунок 24 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Богучарского района (дата съемки 03.05.2022)

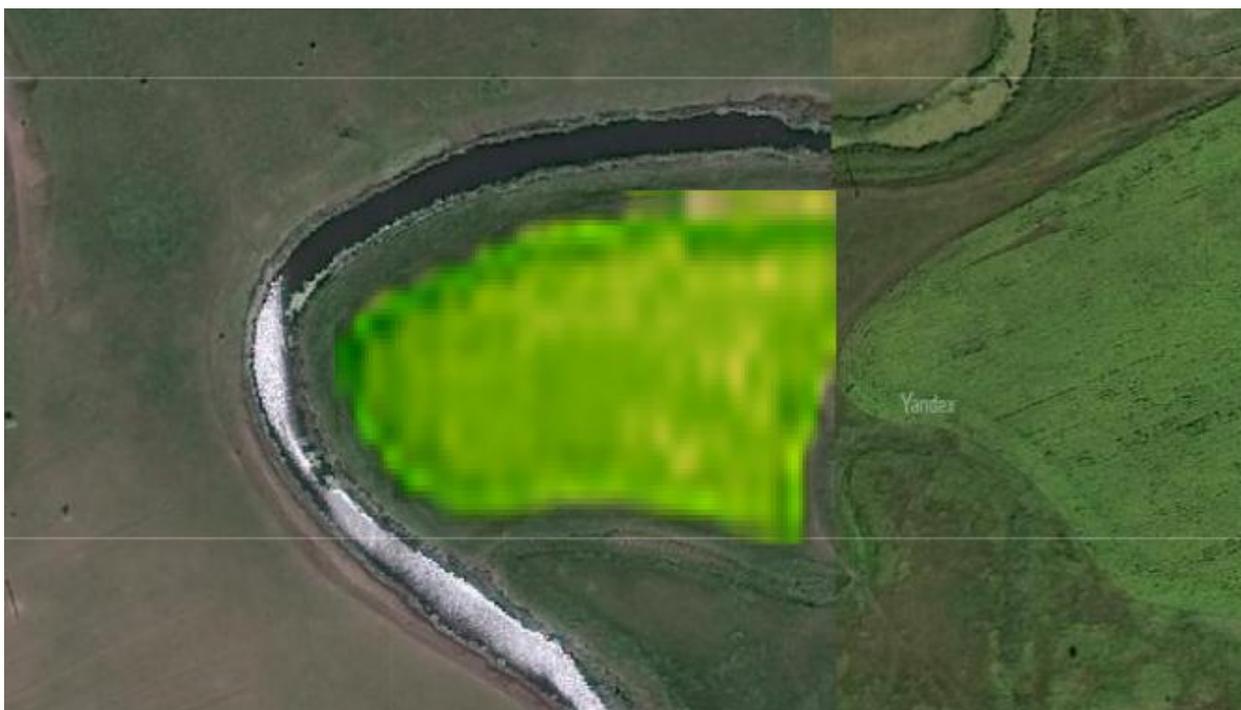


Рисунок 25 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Таловского района (дата съемки 05.05.2021)

На картах NDVI наблюдается уменьшение контраста значений индекса, соответствующее уменьшению степени пространственной дифференциации надземной фитомассы. Для математической оценки степени неравномерности распределения биомассы травянистой растительности на изучаемых участках лугов, был выполнен расчет амплитуды значений NDVI для каждого дня съемки с последующим хронологическим сопоставлением временных рядов за каждый год проведения исследования.

На рисунке 26 приведен пример диаграммы сезонной динамики амплитуд значений индекса NDVI, который показывает закономерность уменьшения пространственных различий в распределении фитомассы по мере развития надземных органов растений лугового сообщества от начала весенней вегетации до первого укоса с последующим повторением данного явления по мере послеукосного отрастания. В приложении 4 показаны графики сезонной динамики амплитуд индекса NDVI для всех изучаемых

объектов за весь период исследований. Из анализа диаграмм изменения амплитуды значений индекса NDVI, соответствующего разбросу абсолютных значений количества надземной фитомассы на единицу площади, следует:

а) характер уменьшения амплитуды значений индекса NDVI повторяется на всех луговых территориях исследуемых природно-климатических зон Воронежской области на протяжении всего периода наблюдений, что позволяет сделать вывод о том, что описанная закономерность может иметь устойчивый характер.

б) учитывая известную взаимосвязь между индексом NDVI и количеством зеленой надземной фитомассы, анализ амплитуды значений NDVI в границах изучаемого участка может являться индикатором степени пространственной неоднородности растительного покрова.

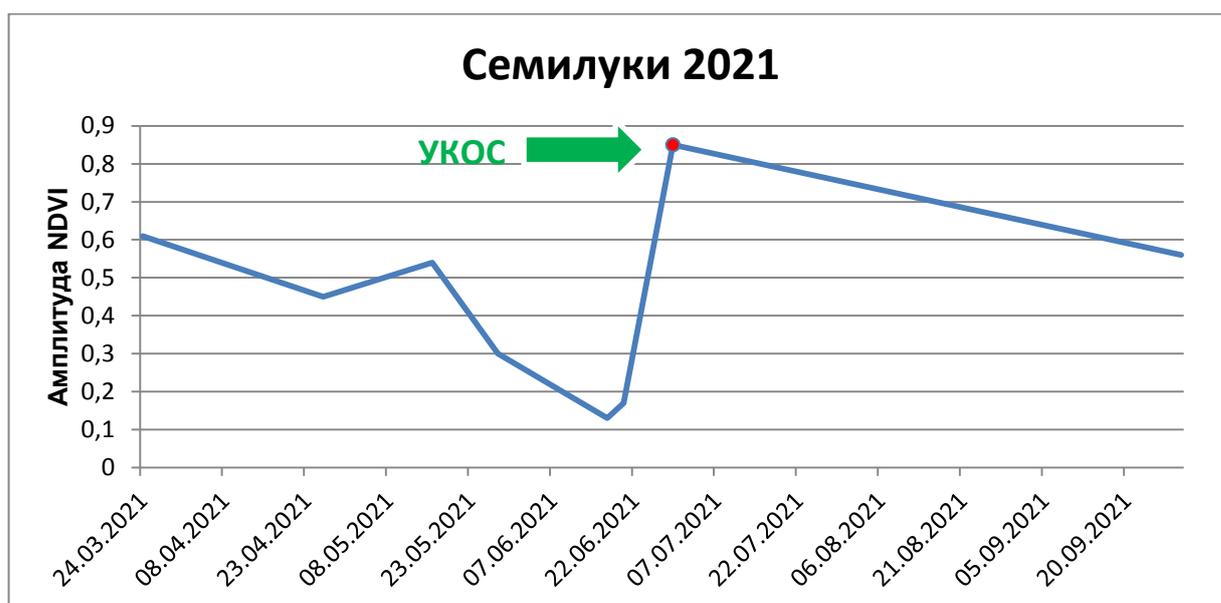


Рисунок 26 – График сезонной динамики амплитуды значений индекса NDVI для лугового участка Семилукского района за 2021 год

*Пространственное распределение надземной фитомассы лугов при достижении пика вегетации.* Максимальные значения индекса NDVI, предшествующие первому укусу, для каждого исследуемого объекта были зафиксированы в каждый год исследования. В таблице 11 приведены даты

наступления пиков вегетации, определенные по максимумам значений индекса.

Таблица 11 – Даты зафиксированных пиков надземной фитомассы по максимумам NDVI

Среднемноголетний максимум	Сезонный максимум	Значение NDVI (среднее в границах участка)
<i>Семилукский</i>		
17.06	20.06.2021	0,89
	25.06.2022	0,87
	07.06.2023	0,84
<i>Терновский</i>		
04.06	08.06.2021	0,77
	04.06.2022	0,71
	02.06.2023	0,80
<i>Богучарский</i>		
18.06	15.06.2021	0,91
	19.06.2022	0,87
	22.06.2023	0,89
<i>Таловский</i>		
27.05	25.05.2021	0,88
	23.05.2022	0,91
	02.06.2023	0,91

Для оценки различий в сроках достижения максимального уровня надземной фитомассы, был выполнен расчет среднемноголетних дат первого сезонного пика NDVI за период наблюдений. При рассмотрении всего интервала исследований, самый ранний пик был отмечен в Таловском районе (23.05.2022), а самый поздний – в Семилукском (25.06.2022). При рассмотрении среднемноголетних значений, исследуемые объекты по районам их расположения можно выстроить в следующем порядке по датам наступления максимумов NDVI (от раннего к позднему): Таловский, Терновский, Семилукский, Богучарский.

Карты пространственного распределения значений индекса NDVI на момент первого сезонного пика вегетации на всех изучаемых участках

луговых территорий демонстрируют значительное снижение визуально определяемой пространственной неоднородности растительного покрова, что сопровождается снижением амплитуд значений индекса. На рисунках 27 – 30 приведены примеры карт NDVI для исследуемых объектов.



Рисунок 27 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Семилукского района в период пика вегетации (2022 год)



Рисунок 28 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Терновского района в период пика вегетации (2021 год)



Рисунок 29 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Богучарского района в период пика вегетации (2021 год)



Рисунок 30 – Карта распределения значений индекса NDVI для лугового участка Таловского района в период пика вегетации (2023 год)

Снижение степени пространственной дифференциации луговой растительности в момент максимального развития надземной фитомассы на наш взгляд связано с выравниванием условий увлажнения отдельных участков луга при наступлении межени, что сопровождается возникновением оптимальных условий не только для группы мезогигрофитов, но и для мезофитов.

**Сезонная динамика надземной фитомассы.** Сравнение средних значений индекса NDVI в момент первого сезонного пика исследуемых лугов, позволяет сделать вывод о существовании различий в количестве надземной фитомассы на единицу площади. В настоящее время известна взаимосвязь между количеством надземной зеленой массы растений и значениями индекса NDVI. Данная закономерность используется при разработке алгоритмов прогнозирования урожайности ряда сельскохозяйственных культур [31, 145, 154].

Для изучения взаимосвязи результатов дистанционного мониторинга вегетации луговой растительности с объективно наблюдаемыми явлениями (начало весенней вегетации, скашивание травостоя, повторное отрастание травостоя), был выполнен анализ временной динамики средних значений индекса NDVI для каждого исследуемого объекта. С целью визуализации сезонной динамики значений индекса были построены диаграммы. На рисунках 31 – 34 показаны примеры графиков сезонного изменения NDVI для изучаемых лугов четырех районов Воронежской области. В приложении 5 представлен полный комплекс графиков сезонной динамики за весь период исследования.



Рисунок 31 – График динамики средних значений индекса NDVI для участка луга Семилукского района за 2021 год (красными точками отмечены моменты выполнения укосов)



Рисунок 32 – График динамики средних значений индекса NDVI для участка луга Терновского района за 2022 год (красными точками отмечены моменты выполнения укосов)



Рисунок 33 – График динамики средних значений индекса NDVI для участка луга Богучарского района за 2021 год (красными точками отмечены моменты выполнения укосов)



Рисунок 34 – График динамики средних значений индекса NDVI для участка луга Таловского района за 2023 год (красными точками отмечены моменты выполнения укосов)

При анализе диаграмм, отмечается следующее:

а) на всех изучаемых объектах наблюдается характерный рост средних значений NDVI в весенний период, что соответствует наблюдаемому приросту надземной фитомассы в тот же период.

б) крутизна графика NDVI в интервале апрель-май на наш взгляд соответствует величине среднесуточной продукции фитоценоза в период активной вегетации растений.

в) на графиках явным образом присутствуют резкие «провалы» значений индекса, совпадающие с периодами выполнения сенокосения на каждом из изучаемых лугов, что соответствует данным визуальных наблюдений. При этом количество периодов резкого снижения NDVI в течение сезона соответствует количеству выполненных укосов.

г) крутизна кривой индекса в послеукосный период предположительно может соответствовать среднесуточной скорости набора надземной фитомассы при повторном отрастании травостоя.

Дистанционный мониторинг на основе мультиспектральной съемки позволил выявить закономерности пространственной неравномерности распределения надземной фитомассы в различные периоды вегетации луговых растений на каждом их исследуемых объектах. Также были получены сведения о сезонной динамике фитомассы, определяемой по относительному изменению значений индекса NDVI в пределах границ изучаемых луговых участков.

### **3.3 Сравнительный анализ результатов исследования**

В ходе проведенного исследования, были собраны данные относящиеся к прямым (натурным) и дистанционным методам мониторинга состояния и оценки особенностей функционирования луговых растительных сообществ. Каждый вид полученных данных обладает самостоятельной ценностью и дает представление о некоторых свойствах природных лугов, характеризуя их условно постоянные и пространственно-временные параметры. При изучении теоретических основ методов прямых и дистанционных измерений, применяемых при оценке состояния растительного покрова природных территорий, было собрано достаточно много информации об аспектах применимости того или иного метода для целевого объекта. Опыт более ранних исследований других авторов показал широкую применимость способов учета количества надземной фитомассы методом с помощью рамки заданной площади для оценки продуктивности травяных экосистем пойменных и континентальных лугов [28, 32, 129]. В части дистанционных методов, основанных на использовании вегетационных спектральных индексов, получаемых при обработке материалов мультиспектральной съемки, удалось выявить способы приложения данного инструмента к решению сходных задач в отношении близких по типу к изучаемым объектам исследования. По причине отсутствия известных к настоящему времени работ по параллельному мультиметодичному мониторингу луговых травяных

сообществ Воронежской области, была определена научная и практическая новизна данной работы.

Одной из главных задач исследования являлось сопоставление методов натурного и дистанционного мониторинга растительных сообществ природных лугов. Для оценки взаимосвязи результатов, полученных при натуральных и дистанционных измерениях, была выдвинута гипотеза исследования о том, что фитомасса растений, количественно измеряемая при натурном обследовании, имеет корреляционную связь со спектральной характеристикой, детектируемой посредством вегетационного индекса NDVI. Для определения характера взаимосвязи по проверке гипотезы исследования, было проведено сопоставление пар значений временных рядов, получаемых при сравнении дат выполнения мультиспектральной съемки и прямого измерения количества надземной фитомассы. В выборках параллельных пар значений был рассчитан коэффициент корреляции и, соответственно, коэффициент детерминации.

На рисунках 35 – 38 показаны результаты сопоставления значений вегетационного индекса NDVI и надземной фитомассы при естественной влажности для исследуемых объектов.

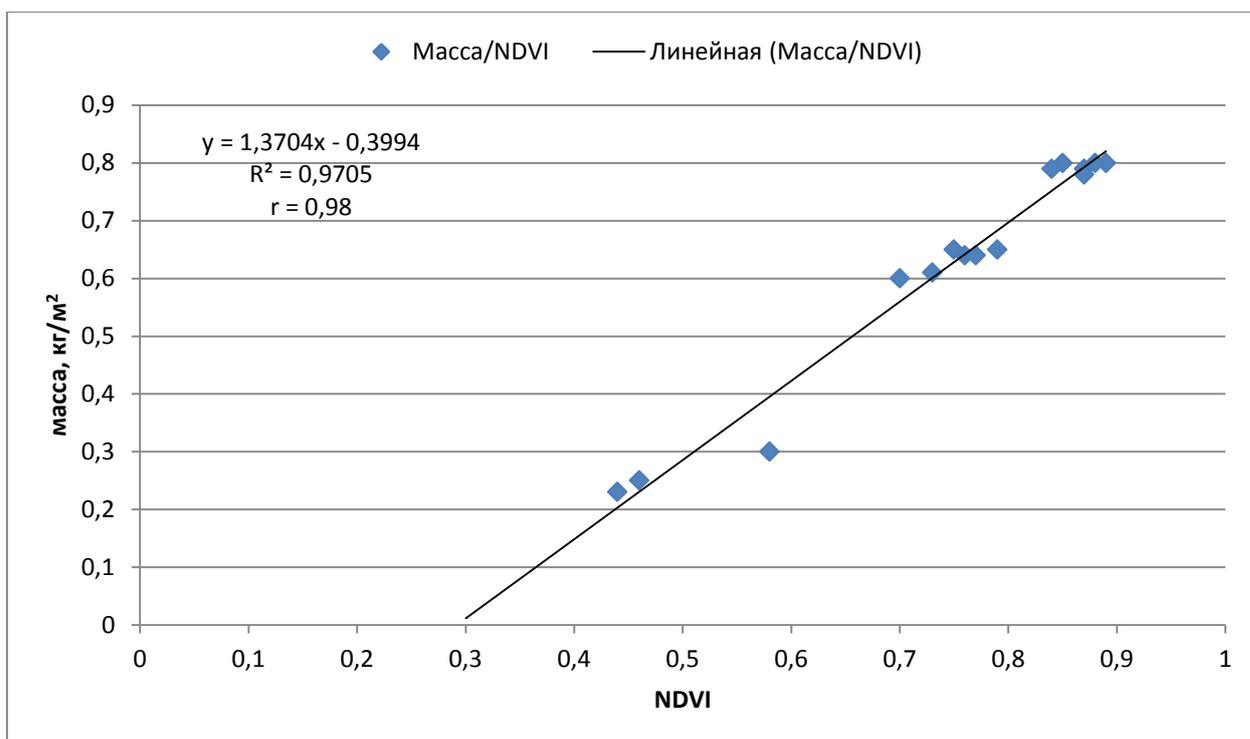


Рисунок 35 – Сопоставление значений «масса/NDVI» для луга Семилукского района Воронежской области

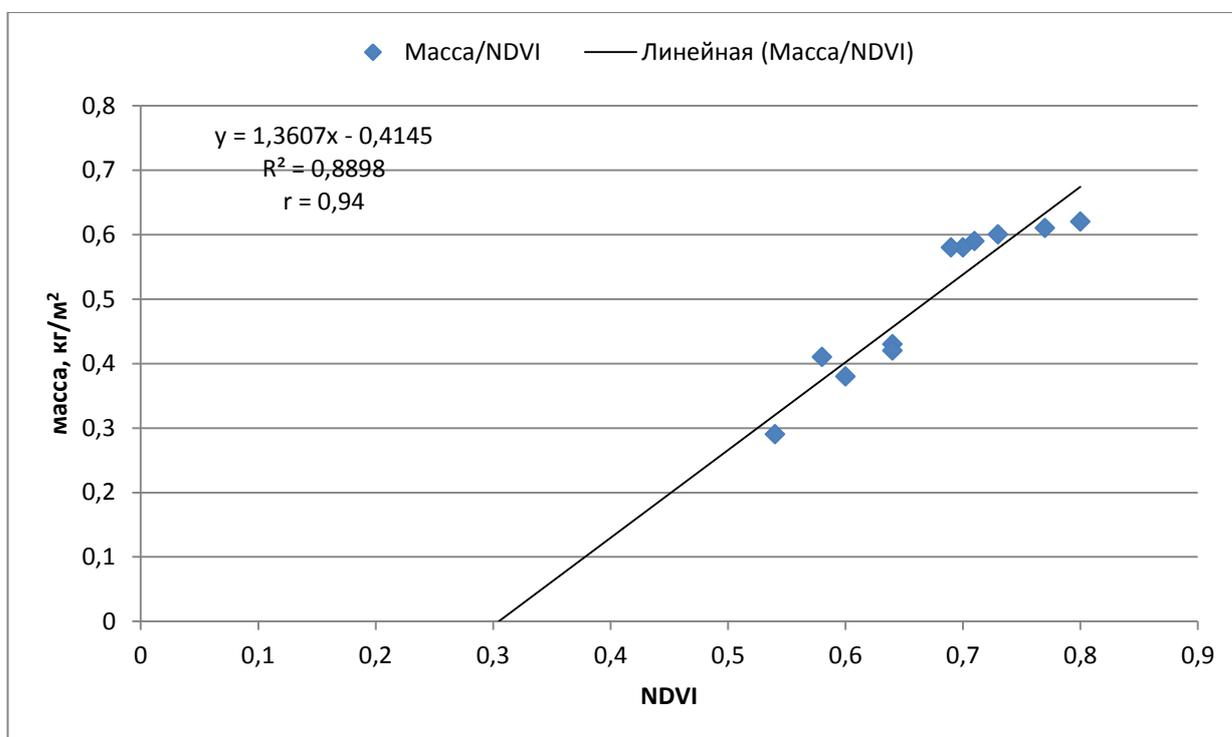


Рисунок 36 – Сопоставление значений «масса/NDVI» для луга Терновского района Воронежской области

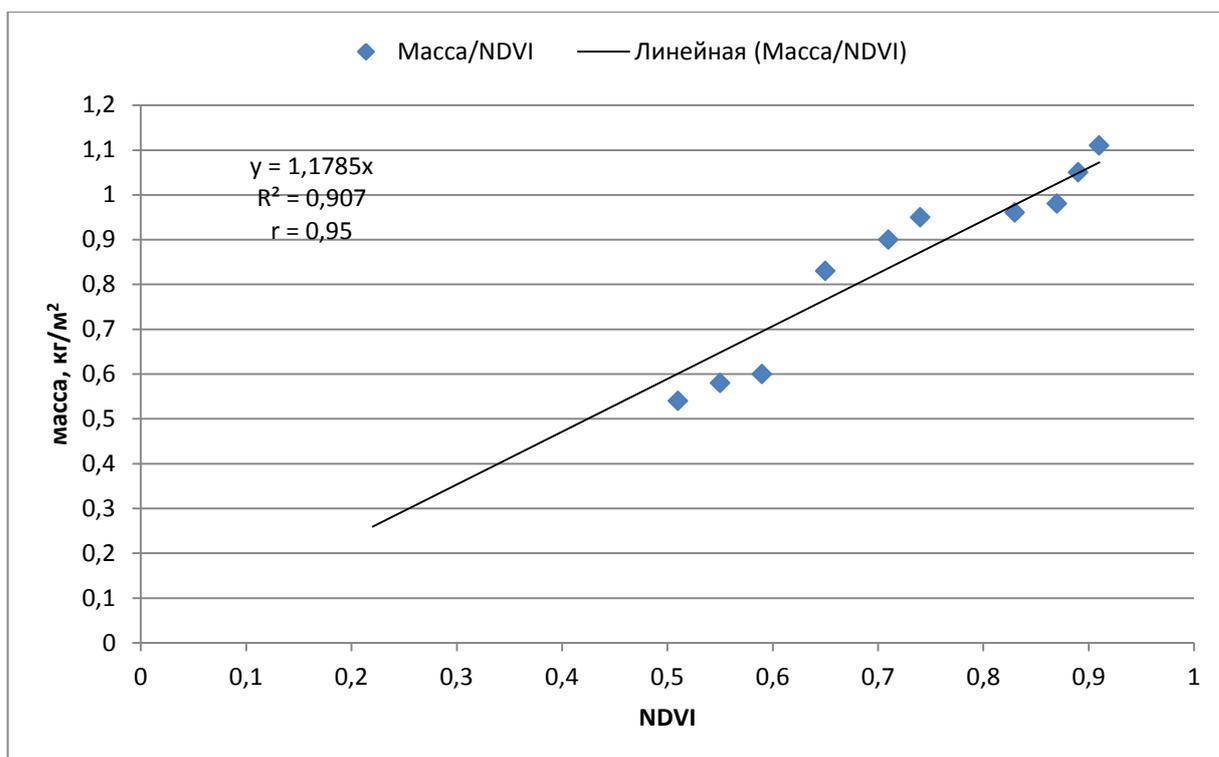


Рисунок 37 – Сопоставление значений «масса/NDVI» для луга Богучарского района Воронежской области

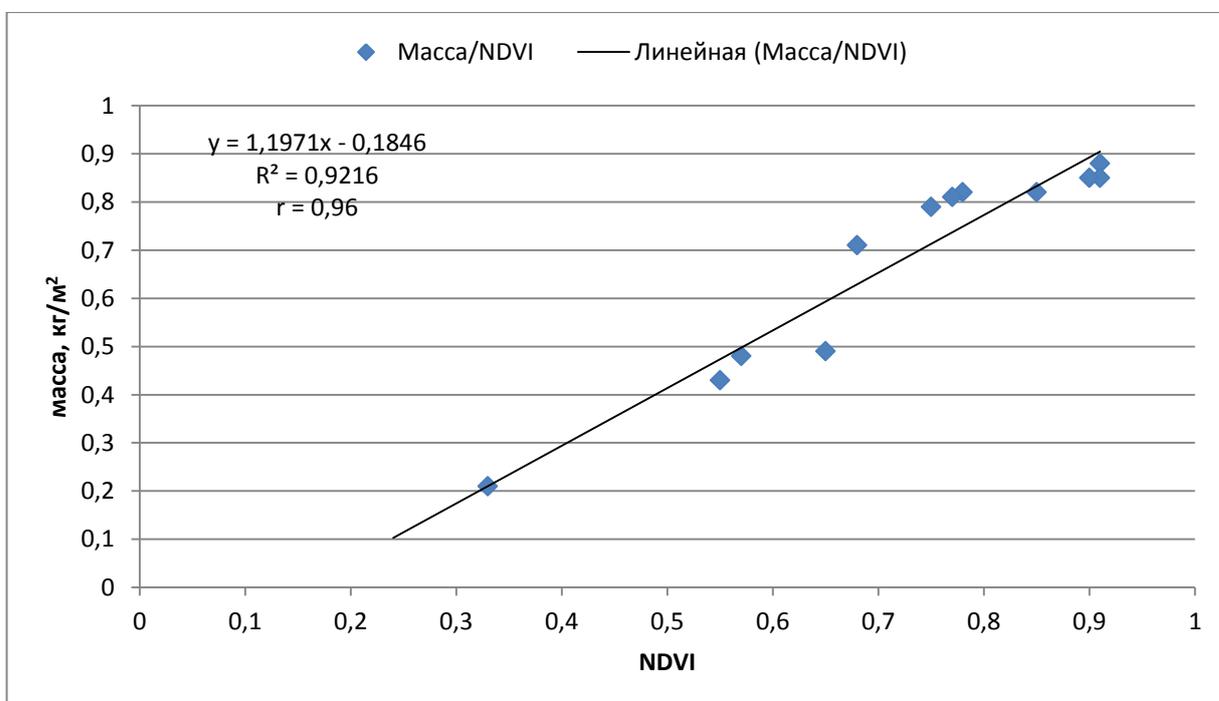


Рисунок 38 – Сопоставление значений «масса/NDVI» для луга Таловского района Воронежской области

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

а) существует высокая корреляция ( $r = 0,93...0,98$ ) между дистанционно определяемым значением индекса NDVI и измеряемым при натурном обследовании количеством надземной фитомассы на единицу площади.

б) взаимосвязь двух показателей имеет линейный характер зависимости и может быть описана уравнением регрессии вида:

$$y = A * x - B, \quad (2)$$

где

**A** и **B** – угловой коэффициент и константа, соответственно

**y** – надземная фитомасса при естественной влажности, кг/м<sup>2</sup>

**x** – значение индекса NDVI

в) угол наклона линии тренда и точка ее пересечения с осью **x** отличаются для уравнений регрессии, полученных в разных районах исследования. Данное явление обусловлено отличиями в характере сезонной динамики вегетации луговой растительности на фоне разных природно-климатических условий каждого из исследуемых районов.

Обнаруженная взаимосвязь между измеряемой при натурном исследовании величиной количества надземной фитомассы луга и значением вегетационного индекса NDVI, показывает возможность использования дистанционного метода для количественной оценки характера пространственного распределения растительной массы луга, а также для оценки динамики вегетации растений лугового фитоценоза в течение сезона.

## **4 ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО РЕСУРСА ЛУГОВО- ПАСТБИЩНЫХ БИОЦЕНОЗОВ**

### **4.1 Пространственно-временная дифференциация биологического ресурса**

Проведенный мониторинг луговых территорий, с использованием натуральных и дистанционных методов исследования, дает возможность разносторонней оценки текущего состояния биологического ресурса природных фитоценозов как объекта, используемого в сельскохозяйственной деятельности. Временная и пространственная изменчивость является неотъемлемой характеристикой всех биологических систем. При этом, возможность получения представительной оценки пространственного распределения хозяйственно-ценной фитомассы природных луговых территорий в разные временные интервалы имеет высокое значение, как для планирования хозяйственного использования, так и для выявления рисков деградации растительных сообществ.

Оценка карт вегетационного индекса NDVI (см. приложение 3), получаемых в результате обработки сезонных серий мультиспектральных изображений, показала высокую информативность для выявления пространственной неравномерности распределения надземной фитомассы. На рисунке 39 представлен механизм расчета площади для различных диапазонов значений индекса NDVI при программном анализе пространственной неоднородности луговой территории. Используя принцип интервального зонирования с расчетом эквивалентных площадей диапазонов индекса NDVI, появляется возможность перехода от относительной субъективной оценки горизонтальной вариативности количества надземной фитомассы, получаемой при натурном выборочном измерении, к ее количественному определению.

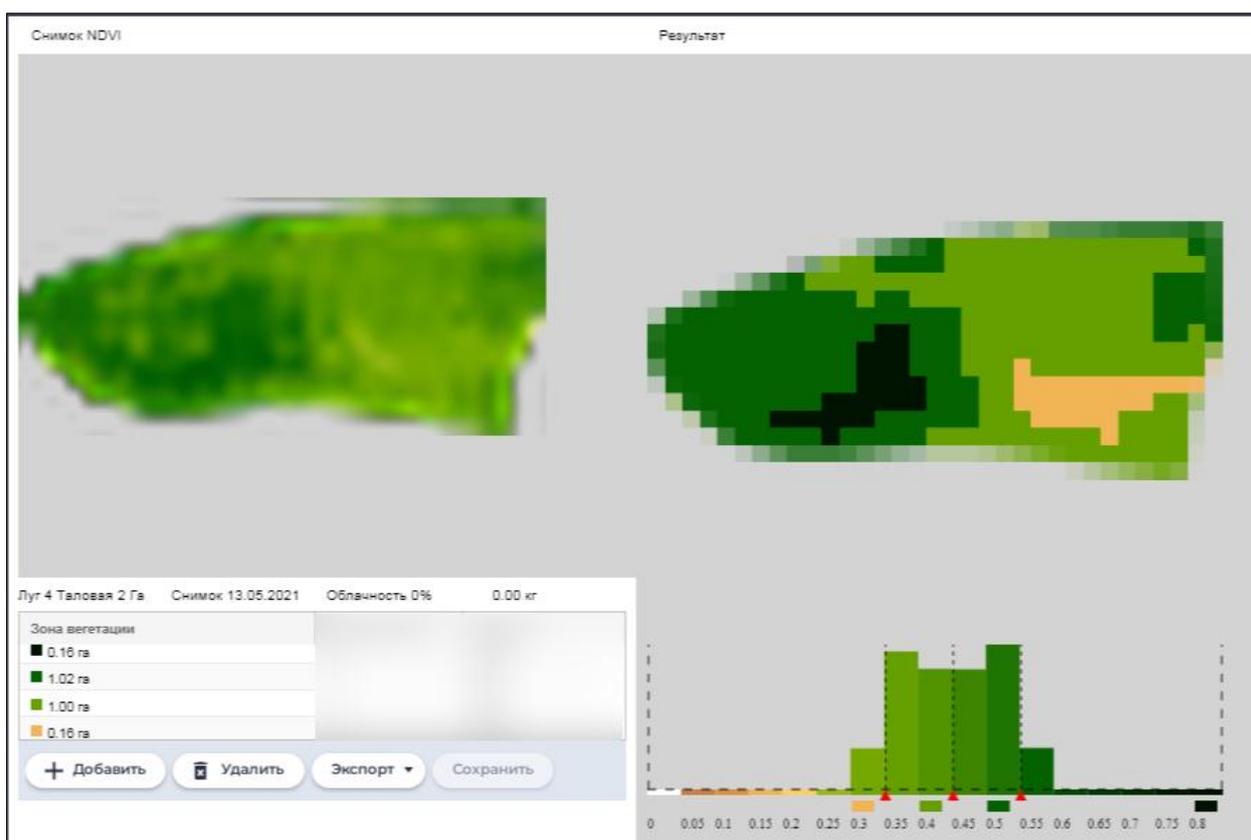


Рисунок 39 – Расчет эквивалентной площади диапазонов значений NDVI с помощью ПО для геопространственного анализа на примере участка пойменного луга Таловского района Воронежской области

Использование дистанционного метода мониторинга на основе мультиспектральной съемки, позволило получить в ходе исследования непротиворечивые данные о возможности применения среднего (в границах объекта) значения индекса NDVI на дату съемки для оценки сезонной динамики вегетации и изменения количества надземной фитомассы. Анализ графиков значений вегетационного индекса для всех изучаемых объектов показал возможность выявления пиков накопления надземной фитомассы, предшествующих укоосу. На рисунке 40 изображен график сезонной динамики индекса NDVI, где показаны характерные периоды максимума биомассы и периоды послеукоосного минимума.



Рисунок 40 – График сезонной динамики индекса NDVI в сопоставлении с хозяйственно значимыми явлениями на примере лугового участка Таловского района Воронежской области

Таким образом, состояние надземной фитомассы растительного сообщества луга в моменты хозяйственно-значимых изменений может быть оценено при анализе графика динамики вегетационного индекса. Собранные за период исследования сведения о среднемноголетних сезонных пиках биомассы, позволяют сделать вывод о том, что для конкретных природно-климатических условий в сочетании с биологическими особенностями преобладающих видов луговых растений существуют характерные устойчивые интервалы максимумов NDVI. В таблице 12 показаны среднемноголетние (за период исследований) значения сезонных максимумов вегетационного индекса, наблюдавшиеся к моменту первого укоса.

Таблица 12 – Среднемноголетние сезонные максимумы NDVI для районов исследуемых луговых территорий

Год исследования	Сезонный максимум NDVI	Среднемноголетний максимум NDVI
Семилуцкий		
2021	0,89	0,87
2022	0,87	
2023	0,84	
Терновский		
2021	0,77	0,76
2022	0,71	
2023	0,8	
Богучарский		
2021	0,91	0,89
2022	0,87	
2023	0,89	
Таловский		
2021	0,88	0,90
2022	0,91	
2023	0,91	

Очевидны различия в среднемноголетних максимумах NDVI, что при обнаруженной высокой корреляции с количеством надземной фитомассы ( $r > 0,93$ ) подтверждает разницу в скорости первичной биопродукции фитоценозов. Различия обусловлены совокупностью влияния природно-климатических факторов, специфичных для каждого из исследуемых районов, и сложившимся местным характером хозяйственного использования продукции фитоценозов.

#### 4.2 Модель сезонной динамики надземной фитомассы

Совокупность данных, полученных в ходе исследования луговых территорий, расположенных в нескольких природно-климатических зонах Воронежской области, позволяет разработать модель, иллюстрирующую региональные особенности среднемноголетней сезонной динамики

надземной фитомассы луговых травяных экосистем и отражающую их продукционные характеристики.

Исследования продукционных характеристик растительных сообществ, проводимые различными авторами в отношении схожих объектов прочих регионов, в подавляющем большинстве случаев базировались на методах прямых натурных измерений [22, 24, 28, 32, 96, 101, 124, 132, 150]. Данный способ в силу физической трудоемкости работ по прямому подсчету количества надземной фитомассы и сильной зависимости от погодных условий местности, имеет ряд ограничений в части пространственного охвата и периодичности получения данных. Для обеспечения регулярного обследования территории хозяйственно-ценных лугов, необходимо привлечение значительных материальных ресурсов. При этом на практике бывает не просто обеспечить необходимую периодичность проведения измерений из-за логистических особенностей без стационарного нахождения исследователя непосредственно в месте расположения исследуемого объекта.

Очевидным преимуществом метода дистанционного мониторинга является возможность получения результатов измерения с короткой периодичностью, определяющейся техническими параметрами работы орбитального аппарата, используемого для получения материалов первичной мультиспектральной съемки. Нами обоснована возможность получения мультиспектральных снимков с интервалом 2-3 дня в зависимости от места расположения исследуемого объекта и влияния облачного покрова на момент выполнения съемки. При этом постоянный сплошной пространственный охват измерений для исследуемой площади давал максимальную представительность при оценке пространственной дифференциации надземной фитомассы в отличие от метода прямых натурных подсчетов, где для достижения близкой репрезентативности необходимо многократное увеличение количества учетных площадок и пропорциональное увеличение трудоемкости работ.

Основываясь на объективной представительности данных дистанционного мониторинга и наличии серии параллельных измерений количества надземной фитомассы в различные периоды вегетации, полученных при натурных обследованиях, было выполнено обобщающее сопоставление значений для получения модели количественной оценки фитомассы пойменных лугов. В приложении 2 приведен перечень пар значений «NDVI/фитомасса» для всех исследуемых лугов, который использовался для разработки модели. На рисунке 41 показана точечная диаграмма, примененная для калибровки модели и расчета уравнения регрессии.

В результате было получено уравнение регрессии, лежащее в основе модели:

$$P_m = 1,3338 * NDVI - 0,3023, \quad (3)$$

где

**$P_m$**  – количество надземной фитомассы при естественной влажности в кг/м<sup>2</sup>

**NDVI** – значение вегетационного индекса NDVI в единицах индекса

Для уравнения регрессии была определена величина коэффициента корреляции  $r = 0,85$  и показатель  $R^2 = 0,73$ .

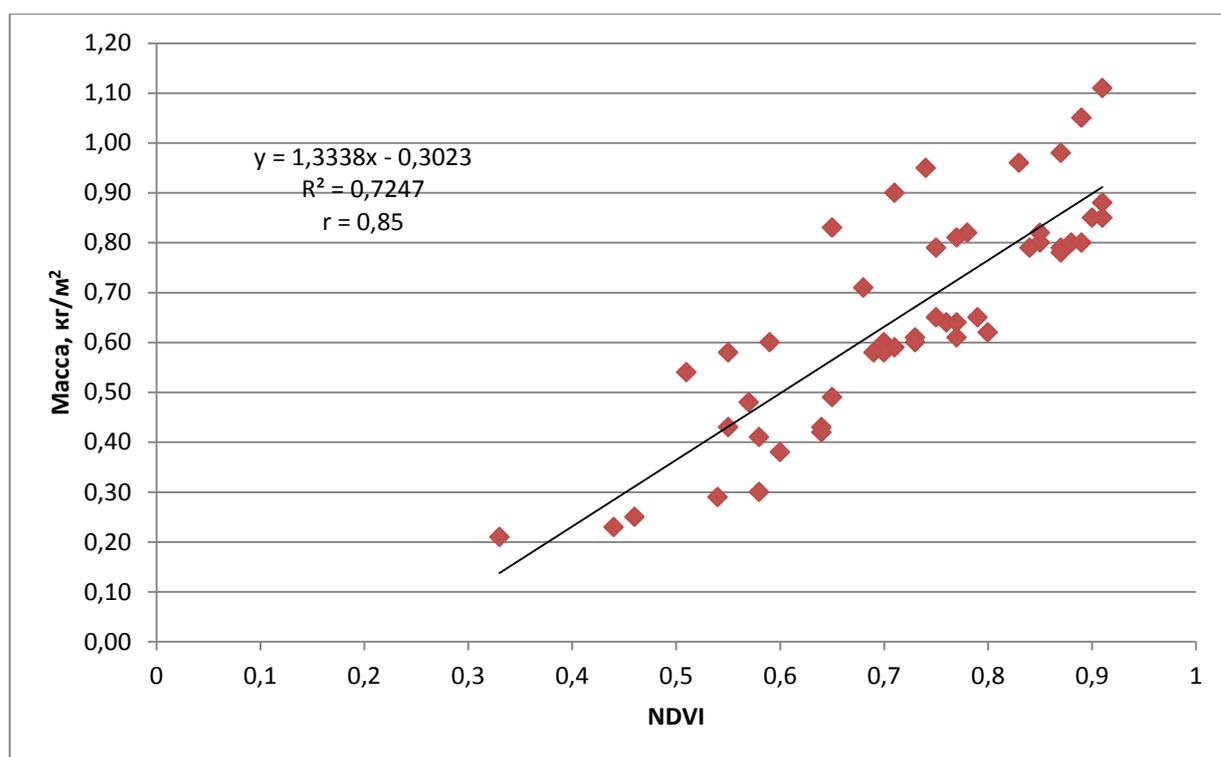


Рисунок 41 – Диаграмма калибровочных значений модели количественной оценки фитомассы лугов по данным дистанционного мониторинга

Для проверки модели выполнена серия расчетов с предсказанием количества надземной фитомассы на  $1 \text{ м}^2$  и последующим сравнением значений с заведомо известными величинами количества фитомассы, полученными прямым натурным измерением при проведении учетов по рамкам с площадью  $0,25 \text{ м}^2$ . В таблице 13 показан результат расчетов и сопоставлений прогнозируемого значения, рассчитанного на основе модели с измеренным значением. Для сравнительного анализа значений были взяты 12 пар параллельных измерений методом случайной выборки из имеющегося массива данных, собранных в ходе исследования. Величина индекса NDVI была использована для вычисления прогнозного количества фитомассы.

В результате выполнения расчетов были получены величины абсолютных отклонений прогнозных значений от фактически измеренных, для которых был применен критерий оценки значимости (Вилкоксона) [58, 80].

Таблица 13 – Сравнение предсказанных и фактических значений количества надземной фитомассы

№	Район	Дата	NDVI	$Pm_{ф},$ кг/м <sup>2</sup>	$Pm_{п},$ кг/м <sup>2</sup>	Откл. Абс.	T	T <sup>+</sup>	T <sup>-</sup>
1	Сем.	25.04.2021	0,46	0,25	0,31	-0,06	5	0	5
2	Сем.	08.05.2022	0,77	0,64	0,72	-0,08	6	0	6
3	Сем.	05.06.2023	0,84	0,79	0,82	-0,03	2	0	2
4	Тер.	25.05.2021	0,7	0,58	0,63	-0,05	3	0	3
5	Тер.	09.06.2021	0,77	0,61	0,72	-0,11	5	0	5
6	Тер.	03.05.2023	0,73	0,6	0,67	-0,07	3	0	3
7	Богуч.	24.04.2022	0,59	0,6	0,48	0,12	4	4	0
8	Богуч.	19.06.2022	0,87	0,98	0,86	0,12	4	4	0
9	Богуч.	04.06.2023	0,83	0,96	0,80	0,16	4	4	0
10	Тал.	08.07.2021	0,85	0,82	0,83	-0,01	1	0	1
11	Тал.	15.04.2022	0,68	0,71	0,60	0,11	2	2	0
12	Тал.	15.05.2023	0,9	0,85	0,90	-0,05	1	0	1
Средн.откл.						0,002	-	-	-
n = 12							T <sub>ф</sub>	14	26
Т-критерий Вилкоксона для n = 12 при p=0,05						17			
T (фактический)						14			
$T_{ф} < T_{к}$									
Сокращения:									
Сем. – Семилукский район									
Тер. – Терновский район									
Богуч. – Богучарский район									
Тал. – Таловский район									
Pm <sub>ф</sub> – Фитомасса фактически измеренная									
Pm <sub>п</sub> – Фитомасса предсказанная на основе модели									

Результаты проверки расчетной модели, выполненной в отношении выборки с известными фактическими данными, показывают средний уровень абсолютного отклонения прогнозной величины от фактической на уровне 0,002 кг/м<sup>2</sup>. На основе проверки связанных выборок по критерию Вилкоксона можно судить о достоверности взаимосвязи при уровне значимости p=0,05.

На рисунке 42 представлено сравнение графиков прогнозных и фактических значений в выборке проверки модели.

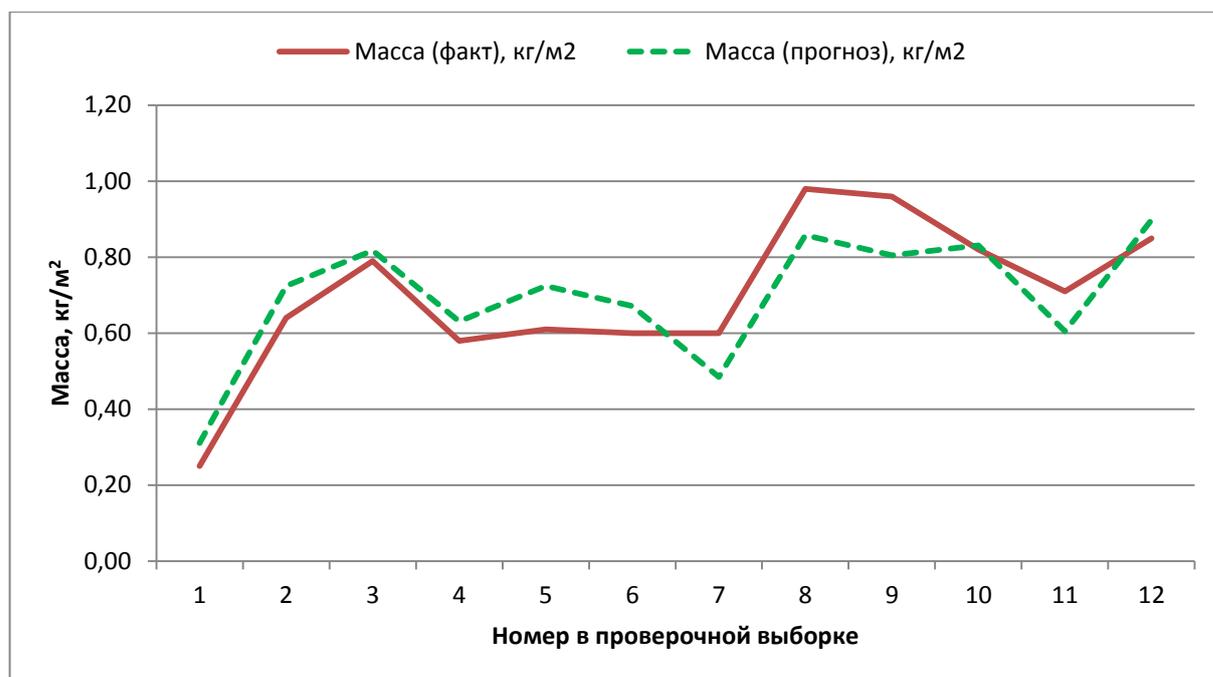


Рисунок 42 – График ряда прогнозных и фактических значений в выборке проверки модели

Принимая во внимание исходный уровень взаимосвязи пар значений калибровочной выборки, использованной при построении модели, имеющей значение  $R^2 = 0,73$  ( $r = 0,85$ ), а также результаты корреляционного анализа выборок пар «NDVI/фитомасса» сгруппированных по местам расположения исследуемых лугов, можно сделать вывод о том, что возможно дальнейшее повышение точности расчетной модели при накоплении представительных данных за более длительный период в рамках более широкого исследования.

Выявленный уровень взаимосвязи между результатами прямых натурных измерений и данными, полученными дистанционным способом на основе анализа мультиспектральных снимков, выражающийся в линейной корреляции с  $r > 0,93$ , позволяет сделать вывод о возможности разработки моделей прогнозирования количества надземной фитомассы лугов различного уровня – от регионального до районного и локального. Представленная выше модель является примером регионального уровня, когда для калибровки были применены данные всех основных природно-климатических зон Воронежской области. При использовании в дальнейшем

массива представительных калибровочных данных на уровне отдельных районов (административных или производственных), соответственно повысится точность прогноза за счет нивелирования влияния различий в режиме погоды. Значение коэффициента корреляции, наблюдаемое в данном исследовании для локальных выборок выше, чем для общей региональной выборки ( $r_{\text{локальный}} > 0,93$ ;  $r_{\text{региональный}} = 0,85$ ).

#### **4.3 Способ оптимизации использования биологического ресурса лугово-пастбищных биоценозов Воронежской области**

Природные пойменные луга Центрального Черноземья на протяжении длительного периода времени являются важными объектами, используемыми в хозяйственной деятельности человека. Естественные кормовые угодья и сенокосы, организуемые на луговых территориях речных пойм Воронежской области, имеют важное хозяйственное значение. Луговые травяные экосистемы, будучи природным объектом, обладают высокой продукционной способностью, которая стала причиной высокого научного и прикладного интереса. В исследованиях Л. Г. Раменского, М. И. Ненарокова, И. Г. Андреева, И. А. Цаценкина, выполненных в начале и середине XX века на базе Павловской луговой опытной станции, была показана возможность и экономические преимущества сельскохозяйственного использования природного биологического ресурса пойменных лугов Воронежской области как источника ценных кормов. Был разработан ряд приемов и способов улучшения природных кормовых угодий, а также сохранения их продукционного потенциала и снижения рисков деградации [37].

В настоящее время биологический ресурс луговых травяных сообществ, формирующих растительный покров пойменных лугов региона, имеет высокое значение для обеспечения экологически чистыми видами кормов сельхозтоваропроизводителей из категорий малых форм хозяйствования (фермерские предприятия), а также личных подсобных хозяйств населения сельских территорий [61, 123]. Исследуемые луговые

территории расположены в четырех районах Воронежской области, относящихся к различным природно-климатическим зонам. При этом все луговые участки используются для сенокосения и заготовки кормов (рисунок 43). В ходе наблюдений, выполнявшихся с использованием комбинации прямых натуральных и дистанционных методов, было установлено, что в ряде случаев на наиболее продуктивных лугах выполняется до трех укосов за вегетационный период. В результате интервьюирования представителей хозяйствующих субъектов, использующих луговые территории для сенокосения, основным критерием выбора времени и целесообразности выполнения укосов является субъективная визуальная оценка состояния травостоя, а также исторически сложившаяся традиция выбора сроков скашивания луговых трав. Проведение какой-либо стандартизированной оценки состояния растительного покрова луговых угодий со стороны сельскохозяйственных организаций в настоящее время затруднено по причине высокой трудоемкости классических методов прямых натуральных количественных измерений, выполняемых для получения сведений о количестве надземной фитомассы луга, ее пространственной неоднородности и наличии или отсутствии изменений в сравнении с предыдущими периодами. Таким образом, мониторинг состояния природного биологического ресурса, используемого в хозяйственной деятельности, в подавляющем большинстве случаев является не регулярным и редко позволяет получить представительные сведения. На этом фоне имеет место объективное увеличение рисков развития деградационных процессов, оказывающих негативное влияние на сохранность ценных природных видов растений, обеспечение их устойчивого воспроизводства и функционирования всего фитоценоза. Причинами возникновения рисков может быть отсутствие возможности выбора оптимальных сроков сенокосения, отсутствие объективной информации о пространственной неоднородности растительного покрова луга и как следствие возникновение очагов изреженности.



Рисунок 43 – Луговой участок Таловского района после сенокоса  
(Июнь 2022)

Полученные результаты, а также выявленные на их основе закономерности, позволяют предложить ряд способов, направленных на выработку мер оптимизации хозяйственного использования природных пойменных лугов, поддержания их продукционной способности и сохранения ценного биологического ресурса природных видов растений, формирующих луговые фитоценозы. В основе механизма оценки состояния растительного покрова лугов может лежать комбинированный метод, использующий данные дистанционного мультиспектрального мониторинга и натурные измерения.

***Снижение рисков развития очаговой изреженности.*** Для оценки пространственно-временной дифференциации растительного покрова лугов может быть использован способ построения карт спектрального индекса

NDVI, отображающих на коротких временных интервалах горизонтальное распределение вегетирующей фитомассы. Хронологическое сопоставление границ зон снижения значений индекса, соответствующего снижению количества надземной фитомассы, позволяет на ранних этапах выявлять потенциальные очаги изреженности травостоя. На рисунке 44 показан пример пространственного анализа растительного покрова луга, выполняемый с применением специализированного программного обеспечения.

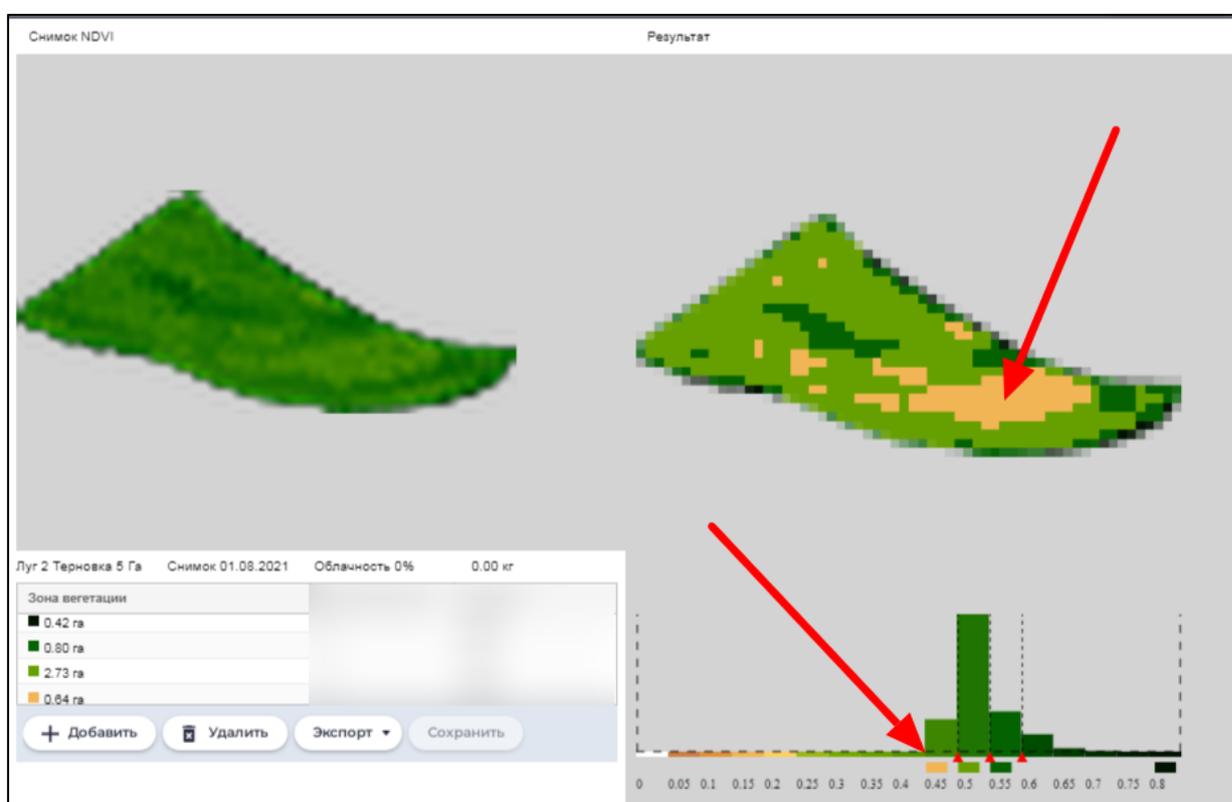


Рисунок 44 – Способ выявления очагов изреженности на примере исследуемого лугового участка Терновского района Воронежской области

Стрелкой на рисунке отмечена зона снижения количества надземной фитомассы и выполнен расчет ее площади составляющей 0,64 га. Также на гистограмме показана величина снижения вегетационного индекса выявленной зоны по отношению к значению большей части площади (снижение на 0,05 ед.) и максимальному уровню индекса, зафиксированному

в данный момент для всего участка (снижение на 0,20 ед.). Обнаруживаемая таким образом неравномерность распределения надземной фитомассы дает возможность выявления устойчивых или временных очагов изреженности. На основе полученных сведений можно корректировать границы и площадь предстоящего укоса, что позволит снизить риск прогрессирования деградации очага изреженности.

**Определение оптимальных сроков сенокосения.** Для выбора времени выполнения укоса травяной массы луга принято ориентироваться на критерии достижения максимального уровня количества надземной фитомассы, а также на достижение требуемой фазы развития преобладающих видов растений. Выполнение укоса при максимальном отрастании надземных частей луговых растений имеет рациональное обоснование с точки зрения экономической целесообразности получения максимума отчуждаемой массы с единицы площади на единицу трудозатрат, сопряженных с технологическим процессом сенокосения и вывоза травяной массы с луга. Существующий способ определения момента достижения максимального показателя количества надземной фитомассы на единицу площади основан на субъективной визуальной оценке состояния травостоя луга, либо на низкорепрезентативном и низкопроизводительном выборочном измерении высоты растений.

В рамках проведенных исследований, выявлена закономерность повторяемости в разные годы характерных пиковых значений количества надземной фитомассы, специфичных для каждого луга. Ретроспективный анализ сезонных максимумов индекса NDVI для рассматриваемого луга позволяет выявить типичный максимальный уровень развития надземной фитомассы, при котором целесообразно выполнение укоса. Повторение аналогичных или близких значений вегетационного индекса при текущей оценке состояния развития травостоя дает возможность выявить момент наступления готовности к скашиванию. Это имеет важное значение в связи с колебаниями погодных условий разных лет и, как следствие, разными

сроками достижения пиковых значений количества надземной фитомассы. В отличие от эмпирического ориентира на типичные календарные сроки сенокосения, особенно в период май-июнь, метод определения пика биомассы по данным дистанционного мониторинга является более надежным и точным.

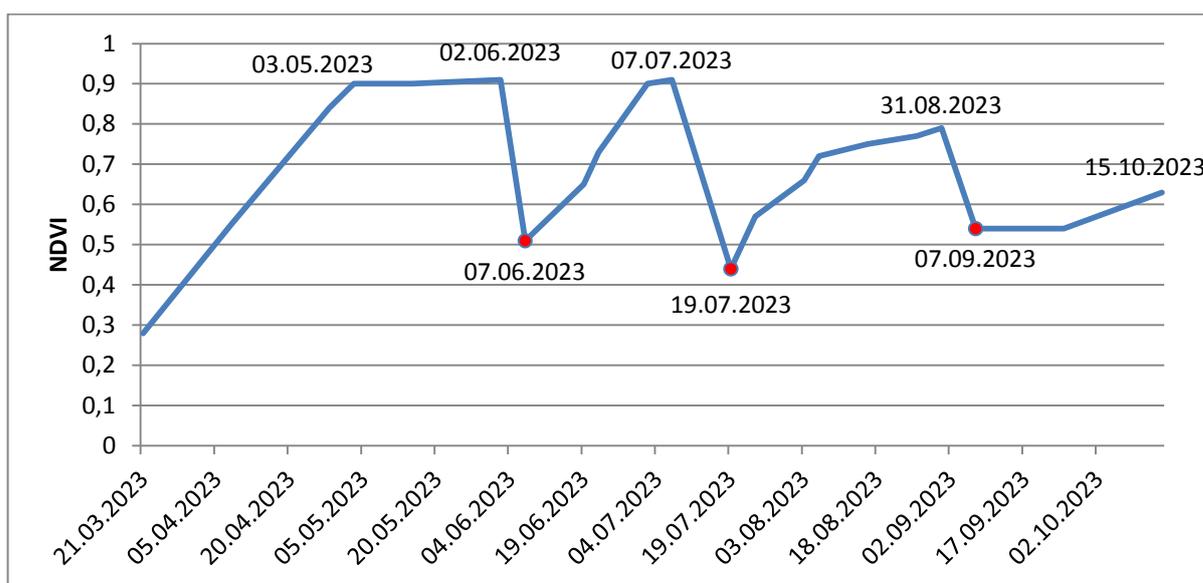


Рисунок 45 – Максимальные уровни индекса NDVI и периоды укосов на примере лугового участка Таловского района Воронежской области (красными точками отмечены послеукосные минимумы)

На рисунке 45 показан пример графика изменения значений индекса NDVI с эквивалентным изменением количества надземной фитомассы, позволяющий выявить моменты достижения пиковых значений, необходимых для выполнения укоса.

**Прогнозирование валового количества травяной массы перед сенокосением.** Процесс укоса травяной массы природного луга при его хозяйственном использовании, сопряжен с необходимостью количественной оценки скошенной фитомассы, необходимой для определения технологических параметров транспортировки и последующего использования. Традиционный подход к оценке ожидаемой массы

скошенного травостоя строится в основном на использовании усредненного веса фитомассы с единицы площади или на исторических среднемноголетних данных о характерной «урожайности» природного луга.

Результаты проведенного исследования показали наличие явно выраженной взаимосвязи с высокой степенью корреляции между значениями индекса NDVI и фактически измеряемым количеством надземной фитомассы луга. Данная закономерность позволила разработать модель прогнозирования массы вегетирующих растений на единице площади по данным дистанционного мониторинга на основе мультиспектральной съемки. Использование расчетной формулы, имеющей вид уравнения регрессии, дает возможность количественного предсказания валового сбора скашиваемой травяной массы с площади луга.

Разработанная модель количественного прогнозирования может быть применена под конкретные условия местности путем уточняющей калибровки с использованием серии натуральных количественных замеров. Вариативность почвенно-климатических условий различных районов, наблюдающаяся даже в пределах одного региона, обуславливает возможность уточнения калибровки модели.

Информация о предварительной количественной оценке валового сбора скашиваемой травяной массы позволит планировать технологический процесс кормозаготовки и выработки путей оптимального распределения растительной массы по формам применения и скармливания.

#### ***Прогнозирование валовой питательности травяной массы луга.***

При хозяйственном использовании биологического ресурса луговых растительных сообществ, важное значение имеет оценка питательности и кормовой ценности надземной фитомассы преобладающих видов растений. В настоящее время известна кормовая и энергетическая ценность вегетативных и генеративных органов большинства хозяйственно-ценных природных видов растений, использующихся в качестве источника кормов для сельскохозяйственных животных. Кормовая ценность определяется

соотношением основных питательных компонентов в виде протеина, жира и клетчатки [14, 55, 89, 90, 91]. В исследованиях А. П. Булатова и Н. А. Лушниковы были показаны различия химического состава и кормовой ценности для различных типов ассоциаций пойменных лугов. В таблице 14 приведены сведения о химическом составе для трех типов растительных ассоциаций [30].

Таблица 14 – Химический состав растительных ассоциаций  
(в г/кг травяной массы)

Ассоциация	Сухое вещество	Сырой протеин	Сырой жир	Сырая клетчатка	БЭВ
Кострецовая	344,4	35,5	11,3	87,2	180,2
Пырейная	327,5	40,3	11,1	86,6	162,2
Осоково-ситниковая	307,6	34,1	9,4	93,9	146,6

Основываясь на сведениях о химическом составе, характерном для ассоциаций преобладающих в структуре растительного покрова луга, можно произвести расчет кормовой ценности и питательности на единицу массы травостоя. Данная информация в дальнейшем может быть использована в качестве дополнительного расчетного компонента к вышеописанному способу прогнозирования валового количества скашиваемой травяной массы. Имея значения кормовой ценности для единицы массы надземных частей растительной ассоциации луга, а также получив сведения об ожидаемом валовом сборе в результате укоса, появляется возможность предсказания валовой питательности скашиваемой массы луговых растений.

В таблице 15 приведен пример прогнозного расчета валовой питательности скашиваемой фитомассы луга для злаковой пырейной ассоциации в фазу начала цветений [14, 78, 87, 89].

Таблица 15 – Прогноз валовой питательности надземной фитомассы луга

NDVI	Масса (прогноз), кг/м <sup>2</sup>	Урожайность в сырой массе, т/га	Доля сухого вещества, %	Урожайность в сухом весе, т/га	Питательность, корм.ед./т	Валовая питательность, корм.ед./га
0,77	0,72	7,2	32,7	2,4	400	948

Для выполнения расчета взяты известные данные о питательности злаковых луговых трав, среднее содержание сухого вещества и прогнозное значение количества надземной фитомассы на 1 м<sup>2</sup>, полученное по уравнению модели на основе текущего значения индекса NDVI. Уравнение расчета валовой питательности имеет вид:

$$P_v = Y_n * K_v * P, \quad (4)$$

где

$P_v$  – валовая питательность, корм.ед/га

$Y_n$  – прогнозная урожайность травяной массы при естественной влажности, т/га

$K_v$  – коэффициент перевода на сухое вещество

$P$  – питательность, корм. ед./т

Таким образом, основываясь на разработанной нами прогнозной модели количества надземной фитомассы луга к моменту укоса и используя сведения о химическом составе и кормовой ценности преобладающих в ассоциации видов трав, появляется возможность расчета ожидаемой валовой питательности скашиваемой травяной массы.

## 5 БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для расчета биоэнергетических характеристик растительных сообществ изучаемых луговых территорий был использован подход, учитывающий пиковые энергетические характеристики видов луговых растений, формирующих фитоценоз, а также максимальное количество надземной фитомассы, зафиксированное для каждого луга за период исследований.

*Биоэнергетика лугов по данным натурных обследований.* В ходе трехлетних наблюдений и количественных учетов, были определены значения количества надземной фитомассы лугов в различные сроки вегетационного периода. В таблице 16 приведены результаты расчетов биоэнергетических характеристик исследуемых лугов.

Таблица 16 – Биоэнергетические характеристики по данным натурных измерений

Район	Максимум фитомассы, кг/м <sup>2</sup>	Валовая энергия, МДж/кг	Энергия, ГДж/га	S, га	Валовая энергия, ГДж/объект
Семилукский	0,80	5,10	40,80	8,94	364,8
Терновский	0,62	6,20	38,44	4,58	176,1
Богучарский	1,11	6,50	72,15	7,64	551,2
Таловский	0,88	5,15	45,32	2,34	106,0

В расчете использованы сведения о запасах валовой энергии зеленой массы преобладающих видов злаковых растений лугов на момент начала цветения [30]. Таким образом, рассчитана валовая энергия на единицу площади, и полученная величина интерполирована на площадь объекта в изучаемых границах.

*Биоэнергетический потенциал по данным дистанционного мониторинга* с применением математической модели прогнозирования

количества надземной фитомассы был рассчитан на основе зафиксированных за период исследования пиковых значений индекса NDVI. Для этого были определены максимумы значения вегетационного индекса за период исследований, соответствующий срокам наступления фазы цветения. В таблице 17 представлены результаты расчета биоэнергетического потенциала по данным дистанционного мониторинга.

Таблица 17 – Биоэнергетические характеристики по прогнозным данным

Район	NDVI	Фитомасса, кг/м <sup>2</sup>	Валовая энергия, МДж/кг	Площадь, га	Валовая энергетическая обеспеченность, ГДж/объект
Семилукский	0,89	0,88	5,10	8,94	403,4
Терновский	0,80	0,76	6,20	4,58	217,2
Богучарский	0,91	0,91	6,50	7,64	452,6
Таловский	0,91	0,91	5,15	2,34	109,8

Совокупный энергетический потенциал объектов исследования, рассчитанный на основе прямых натурных количественных измерений надземной фитомассы лугов, составляет 1198 ГДж. Учитывая разное количество наблюдавшихся укосов в течение сезона на лугах, расположенных в разных районах Воронежской области, можно вывести среднемноголетний коэффициент количества укосов – 1,6. С учетом данного коэффициента, сезонный энергетический потенциал всех исследуемых объектов составил 1917 ГДж.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Осуществленный анализ методов мониторинга динамики вегетации и состояния растительных сообществ лугов позволил установить, что методы прямого количественного учета при точности измерений имеют ряд недостатков, выражающихся в трудоемкости процесса и сложности пространственного охвата при обеспечении представительности данных. Метод дистанционного мониторинга на основе анализа вегетационных спектральных индексов позволяет выполнять оценку состояния растительного покрова территорий любого масштаба с высокой периодичностью получения данных.

2. В результате сравнительного анализа региональных особенностей сезонной динамики вегетации природных лугов представительных территорий Воронежской области были выявлены отличия в характере развития и продукционных характеристиках луговых сообществ, находящихся в различных природно-климатических зонах региона. Количество надземной фитомассы лугов имеет взаимосвязь с широтной зональностью области. Среднемноголетний максимум фитомассы в моменты сезонных пиков вегетации зафиксирован в Богучарском (1,05 кг/м<sup>2</sup>) и Таловском (0,85 кг/м<sup>2</sup>) районах области. Луга северных районов области демонстрировали меньшие значения. Минимальная продуктивность надземной фитомассы была отмечена в Терновском районе (0,61 кг/м<sup>2</sup>). Промежуточное положение занимал луг Семилукского района (0,79 кг/м<sup>2</sup>).

3. Установленные закономерности среднемноголетней сезонной динамики вегетации природных растительных ассоциаций пойменных лугов выявили тесную взаимосвязь периодов максимумов фитомассы с периодами выполнения укосов, а также возникновением послеукосных минимумов и повторного отрастания травостоя, при этом сроки наступления первых сезонных максимумов фитомассы на основании которых установлена среднемноголетняя очередность достижения пиковых значений по

исследуемым районом области обнаруживается в следующей последовательности: Таловский (25.05), Терновский (04.06), Семилукский (17.06), Богучарский (18.06).

4. Характер взаимосвязи между значениями, определяемыми дистанционным методом посредством мультиспектральной съемки с расчетом индекса NDVI, и данными прямых натуральных измерений количества надземной фитомассы, выявил связь между пространственным распределением значений вегетационного индекса и горизонтальным распределением надземной фитомассы луговой растительности. При этом статистически подтверждается высокая корреляционная связь при сравнении парных выборок значений количества фитомассы и индекса NDVI для Семилукского ( $r = 0,98$ ;  $R^2 = 0,97$ ), Терновского ( $r = 0,94$ ;  $R^2 = 0,89$ ), Богучарского ( $r = 0,95$ ;  $R^2 = 0,91$ ) и Таловского ( $r = 0,96$ ;  $R^2 = 0,92$ ) районов.

5. Обнаруженные значения вегетационного индекса на момент соответствующий технологической готовности к скашиванию зеленой массы позволяют определять приближение сроков укосов на основе данных текущего дистанционного мониторинга вегетации луговой растительности.

6. Разработанная прогнозная модель для количественной дистанционной оценки надземной фитомассы лугов региона на основе значений вегетационного индекса выражается уравнением регрессии с расчетной формулой вида:

$$P_m, \text{ кг/м}^2 = 1,3338 * \text{NDVI} - 0,3023$$

7. На основе прогнозной модели предложен способ оценки валовой питательности скашиваемой травяной массы луга. В основе способа лежит использование сведений о химическом составе и кормовой ценности преобладающих в ассоциации видов растений и прогнозируемого количества надземной фитомассы к моменту укоса. Питательность рассчитывается как произведение прогнозного количества фитомассы на кормовую ценность 1т, выраженную в кормовых единицах с учетом влажности травяной массы по формуле:

$$P_{\text{в}}, \text{корм.ед./га} = Y_{\text{п}} * K_{\text{в}} * П$$

8. Оптимизация сельскохозяйственного использования биологического ресурса луговых травяных сообществ региона возможна при проведении дистанционного мониторинга пространственно-временной динамики вегетации луговых ассоциаций для выявления изреженности травостоя, несущей риск развития очаговой деградации фитоценоза и анализе сезонных графиков индекса NDVI для определения сроков готовности травяной массы луга к укусу, а также прогнозировании количества и валовой питательности надземной фитомассы в преукусный период на основе предложенной расчетной модели.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Сельхозтоваропроизводители региона различных форм хозяйствования, осуществляющие деятельность по выращиванию мелкого и крупного рогатого скота, испытывают потребность в обеспечении поголовья растительными кормами. В случае использования природных пойменных лугов в качестве источника корма, обеспечиваемого за счет биологического ресурса хозяйственно-ценных видов луговых растений, важной производственной задачей является организация рационального использования луговых территорий для устойчивого функционирования фитоценозов, формирующих природные кормовые угодья.

На основе выявленных в ходе исследования закономерностей, рекомендуется:

1) Осуществлять мониторинг пространственно-временной динамики развития надземной фитомассы луга с использованием дистанционных методов на основе мультиспектральной съемки. Наиболее целесообразным инструментом является индекс NDVI, который визуализируется в виде карт-схем и позволяет выделять зоны высокой и низкой продуктивности растительного покрова луга с последующим расчетом площади каждой из зон. Данный способ даст возможность планировать границы выполнения укоса для недопущения рисков развития очаговой деградации травяной экосистемы. Участки со сниженным значением индекса (менее чем 0,20 от текущего максимума NDVI в границах косимого луга) исключать из зоны сенокосения для гарантированного достижения генеративных фаз развития и обеспечения воспроизводства растений данной ассоциации.

2) Анализировать сезонную динамику значений индекса NDVI посредством графика временных изменений. Результаты исследования показывают возможность обнаружения характерных пиков надземной фитомассы, соответствующих оптимальным периодам укоса: 0,84 – 0,89 для Семилукского, 0,71 – 0,80 для Терновского, 0,88 – 0,91 для Таловского и 0,87

– 0,91 для Богучарского районов. Ретроспективный анализ графиков сезонных изменений вегетационного индекса за период от 3 лет и более дает возможность выявить значения, достижение которых соответствует готовности травостоя луга к скашиванию. Дистанционный мониторинг позволяет охватывать значительные площади и существенно дополнять традиционные натурные способы оценки состояния растительности лугов в ходе технологической оценки.

3) Использовать предложенную математическую модель, которая на основе текущих актуальных значений вегетационного индекса NDVI позволяет прогнозировать валовое количество (урожайность) скашиваемой травяной массы с площади луга к моменту укоса. Расчет производить по формуле:  $P_m, \text{ кг/м}^2 = 1,3338 * \text{NDVI} - 0,3023$ . Из-за вариативности погодных условий разных лет и возникающих на этом фоне различий в скорости биологической продукции природных лугов в определенные периоды, существуют количественные различия совокупной надземной фитомассы к технологически обоснованному моменту скашивания. Применение прогнозного расчета на основе созданной модели позволит дать оценку ожидаемого количества скашиваемой массы, что имеет важное значение для оптимизации логистики технологических операций по скашиванию, транспортировке и хранению. Также предварительная информация об ожидаемом количестве травяного корма может использоваться зоотехнической службой для планирования фактического рациона сельскохозяйственных животных в сопоставлении с потребностями технологии откорма.

4) Проводить предварительную оценку валовой питательности корма, получаемого при скашивании надземной фитомассы природных лугов по следующей формуле:  $P_b, \text{ корм.ед./га} = Y_n * K_b * П$ . Данная возможность возникает при сочетании информации о количественном прогнозе, получаемом на основе предложенной модели, с известными сведениями о химическом составе и питательной ценности доминантных видов

растительной ассоциации луга. Пример расчета, приведенный в 4 главе настоящей работы, иллюстрирует метод оценки валовой питательности скашиваемого лугового травостоя. Использование аналогии указанного расчета в сопоставлении с информацией о преобладающих видах луговых растений для конкретной территории региона, даст значение ожидаемой питательности отчуждаемой фитомассы, выраженной в количестве кормовых единиц на единицу площади.

Производственное применение метода дистанционного мониторинга кормовых угодий, организованных с использованием биологического ресурса природных видов растений естественных лугов, предлагается осуществлять с использованием специализированного программного обеспечения, представленного на отечественном рынке программных продуктов, решающего задачи обработки данных мультиспектральной съемки.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Использование инновационных исследовательских инструментов для научного поиска в фундаментальных и прикладных областях является сформировавшейся и устойчивой тенденцией последних лет. Развитие науки и техники на фоне активного междисциплинарного проникновения и взаимодействия, дает массу возможностей для изучения применимости подходов и методов одной научной специальности для решения исследовательских и экспериментальных задач другой.

В рамках данной работы был показан пример использования метода мультиспектральной космической съемки для осуществления дистанционного мониторинга состояния биологического объекта – травяной экосистемы природного луга. Указанный метод использовался в сочетании с классическим референсным натурным методом учета при серии параллельных измерений. Материалы мультиспектральной съемки в результате соответствующей математической обработки давали возможность рассчитать значения специализированного разностного вегетационного индекса NDVI. Однако, потенциал мультиспектральных данных достаточно широк и позволяет проводить вычисление прочих разностных спектральных индексов (SAVI, ARVI, MSI, NDWI, GLI и т.д.), которые обнаруживают корреляционную взаимосвязь с характеристиками растительности разного типа.

Объекты исследования, изучаемые в рамках данной работы, относятся к хозяйственно-ценным живым организмам, являющимся ценным природным биологическим ресурсом. При этом обнаруженные применительно к данным объектам закономерности, могут быть потенциально применимы к лугам других природно-климатических зон и географических территорий, а также к прочим схожим объектам – растительным экосистемам континентальных лугов, степей, тундр.

Исходя из текущего видения, полученного на основе результатов проведенного исследования, перспективными направлениями научной разработки темы являются следующие:

1) Уточнение выявленных закономерностей и повышение точности работы прогнозной математической модели за счет расширения выборки калибровочных значений при более детальном исследовании луговых территорий районов Воронежской области, а также масштабирования моделей локального, районного и регионального уровней других территорий.

2) Изучение применимости обнаруженных закономерностей и методологических подходов к растительным объектам других типов и территорий.

3) Исследование возможностей применения прочих производных мультиспектральной съемки в виде разностных спектральных вегетационных индексов для дистанционной оценки свойств растительного покрова хозяйственно-ценных природных территорий и сельскохозяйственных угодий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверина Е. А. Надземная фитомасса луговой степи Центрально-Черноземного заповедника в 2023 году / Е. А. Аверина // Флора и растительность Центрального Черноземья – 2024: Материалы межрегиональной научной конференции, Курская обл., Курский р-н, пос. Заповедный, 20 апреля 2024 года. – Курск: Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник им. проф. В.В. Алехина, 2024. – С. 64-68. – EDN ALMAKD.
2. Аверина Е. А. Травяная растительность бассейна реки Сейм (в пределах Курской области): монография / Е. А. Аверина; Е. А. Аверина; Федеральное агентство по образованию Российской Федерации, ГОУ ВПО Брянский гос. ун-т им. акад. И. Г. Петровского, Каф. ботаники. – Брянск: РИО БГУ, 2010. – ISBN 978-5-88898-421-5. – EDN QKTQSF.
3. Агафонов В. А. Дополнения к флоре Воронежской области / В. А. Агафонов, А. П. Сухоруков // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический. – 2005. – Т. 110, № 2. – С. 88-89. – EDN NSJKXH.
4. Агафонов В. А. Дополнения к флоре бассейна Среднего Дона (Воронежская область) и соседних территорий Центрального Черноземья по материалам гербария Воронежского госуниверситета (VOR) / В. А. Агафонов // Флора и растительность Центрального Черноземья–2022 :Материалы межрегиональной научной конференции, посвященной 140-летию со дня рождения основателя Центрально-Черноземного заповедника профессора В. В. Алехина, Заповедный, 16 апреля 2022 года / ФГБУ "Центрально-Черноземный государственный заповедник" Редакционная коллегия: О.В. Рыжков (ответственный редактор), Н.И. Золотухин. – Заповедный: ИП Бабкина Г.П., 2022. – С. 16-19. – EDN SLSGBL.
5. Агафонов В. А. Флора Средней России. Аннотированная библиография. 1768-2010 гг. [электронный ресурс]. МГУ им. М.В.

Ломоносова, биол. Фак. М., 2013. 1 Cd-r / В. А. Агафонов [и др.] // Ботанический журнал. – 2014. – Т. 99, № 10. – С. 1177-1179. – EDN STSJMN.

6. Агафонов В. А. Эколого-флористические комплексы Окско-Донской равнины: проблемы и перспективы охраны (на примере Воронежской области) / В. А. Агафонов // Глобальные экологические проблемы: локальное решение: Материалы всероссийской с международным участием научно-практической конференции, Борисоглебск, 08–09 ноября 2017 года / Под редакцией Т. С. Завидовской. – Борисоглебск: ООО "Кристина и К", 2018. – С. 4-9. – EDN YPYHFV.

7. Агафонов В.А. Региональная флора: учебно-методическое пособие. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2015. – 51 с.

8. Агафонов В. А. Определитель злаков (Gramineae Juss., Poaceae Barnh.): учебно-методическое пособие / В. А. Агафонов. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2020. – 64 с. – ISBN 978-5-9273-2936-6. – EDN RJFOVL.

9. Агроклиматические ресурсы Воронежской области: справочник / Страшный В.Н. [и др.]. – Л., 1972. – 108 с.

10. Агрорландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий Европейской части России / И. А. Трофимов, В. М. Косолапов, Л. С. Трофимова, Е. П. Яковлева // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 12. – С. 116-119. – EDN SZTODF.

11. Агрорландшафтно-экологическое районирование природных кормовых угодий регионов России / И. А. Трофимов, Л. С. Трофимова, Е. П. Яковлева [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2024. – Т. 79, № 2. – С. 43-53. – DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.4. – EDN RDPFWP.

12. Акимов Л. М. Анализ гидротермического режима центра Русской равнины с учетом солнечной активности в летний период / Л. М. Акимов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2015. – № 4. – С. 90-98. – EDN VWNAZX.

13. Акимов Л. М. Биоклиматическая оценка территории Центрального Черноземья / Л. М. Акимов // Экологическая безопасность и охрана окружающей среды в регионах России: теория и практика: материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Волгоград, 17–18 ноября 2016 года / ФГАОУ ВО "Волгоградский государственный университет"; Редколлегия: главный редактор Е. А. Иванцова, А. В. Холоденко, Ю. С. Половинкина. – Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2016. – С. 353-357. – EDN YVCGZX.

14. Акманаев Э. Д. Кормопроизводство и луговое хозяйство (раздел «Луговое кормопроизводство») / Э. Д. Акманаев, В. А. Попов; Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова. – Пермь: ИПЦ Прокрость, 2022. – 218 с. – ISBN 978-5-94279-576-4. – EDN CZTVQM.

15. Александрова В. Д. Опыт определения надземной и подземной массы растительности в арктической тундре / В. Д. Александрова // Ботанический журнал. – 1958. – Т. 43, № 12. – С. 1748–1761.

16. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия / Г. В. Добровольский, П. Н. Балабко, Н. В. Стасюк, Е. П. Быкова // Аридные экосистемы. – 2011. – Т. 17, № 3(48). – С. 5-13. – EDN OOXUFX.

17. Атлас Воронежской области: Учебно-справочное пособие / А. Б. Ахтырцев, Э. Г. Байкова, Г. И. Барабаш [и др.]; Министерство образования РФ, Воронежский государственный педагогический университет; редколлегия: В. В. Подколзин (ответственный редактор), Ермоленко, Н. Н. (редактор). – Воронеж: Воронежский государственный педагогический университет, 1994. – 48 с. – EDN VJMZYN.

18. Ахтырцев А. Б. Структура почвенного покрова Среднерусского Черноземья / А. Б. Ахтырцев, Б. П. Ахтырцев, Л. А. Яблонских. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2004. – 96 с. – EDN YGMYLN.

19. Ахтырцев Б. П. Генезис и эволюция почв пойменных лесов лесостепи / Б. П. Ахтырцев, Л. А. Яблонских, А. Б. Ахтырцев // Вестник

Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2009. – № 1. – С. 36-40. – EDN KPYTAL.

20. Ахтырцев Б. П. География и структура почвенного покрова Среднерусского Черноземья / Б. П. Ахтырцев, А. Б. Ахтырцев, Л. А. Яблонских // Черноземы Центральной России: генезис, география, эволюция: Тексты докладов международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения основателя Воронежской школы почвоведов Прокопия Гавриловича Адерихина, Воронеж, 25–28 мая 2004 года. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2004. – С. 31-41. – EDN STSQAX.

21. Ахтырцев Б. П. Почвенный покров Среднерусского Черноземья / Б. П. Ахтырцев, А. Б. Ахтырцев. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1993. – 216 с. – EDN YGMHPP.

22. Базилевич Н. И., Семенюк Н. В. Биологическая продуктивность луговой степи Центрально-Черноземного биосферного заповедника при различных режимах использования // Экологический мониторинг в биосферных заповедниках социалистических стран.— Пушино, 1982. С. 115-142.

23. Байкова И. М., Ефимова Н. А., Строкина Л. А. Современное изменение облачного покрова над территорией России. – Метеорология и гидрология, 2002, № 9, с. 52-61. EDN QGPLPB

24. Белоус И. Н. Продуктивность и качество одновидовых посевов многолетних трав в зависимости от уровня минерального питания / И. Н. Белоус, Е. В. Смольский, В. Ф. Шаповалов // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4. – С. 29-33. – EDN THKUUD.

25. Белоус И. Н. Эффективность улучшения природных кормовых угодий после аварии на Чернобыльской АЭС в условиях Центрального района России / И. Н. Белоус, Ю. А. Анишина, Е. В. Смольский // Экономика

сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. – 2011. – № 10. – С. 28-31. – EDN OGIPKV.

26. Белоус Н. М. Урожайность одновидовых посевов луговых трав в зависимости от минерального питания / Н. М. Белоус, Ю. А. Анишина, Е. В. Смольский // Достижения науки и техники АПК. – 2012. – № 2. – С. 57-59. – EDN OWPZRB.

27. Белоус Н. М. Эффективность агротехнических приемов по получению безопасной продукции на пойменных кормовых угодьях / Н. М. Белоус, В. Ф. Шаповалов, Е. В. Смольский // Агро XXI. – 2013. – № 1-3. – С. 41-43. – EDN TZNPUH.

28. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности: / А. А. Титлянова, Н. И. Базилевич, В. А. Снытко [и др.]. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Новосибирск: Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, 2018. – 110 с. – ISBN 978-5-600-02350-5. – DOI 10.31251/978-5-600-02350-5. – EDN YSYAKT.

29. Боровков А. А. Мультиспектральные изображения агроландшафтов как инструмент выявления неоднородности почвенного плодородия / А. А. Боровков, Ю. А. Азаренко // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2023. – № 2(50). – С. 5-15. – EDN WGIWKN.

30. Булатов А. П. Химический состав и энергетическая ценность зелёных кормов по фазам вегетации и циклам стравливания / А. П. Булатов, Н. А. Лушников, Г. Е. Усков // Вестник Курганской ГСХА. – 2016. – № 4(20). – С. 27-32. – EDN XHUASV.

31. Буховец А. Г. О новых подходах к прогнозированию урожайности зерновых культур / А. Г. Буховец, Е. А. Семин, А. К. Горностаев // Современная экономика: проблемы и решения. – 2023. – № 2(158). – С. 8-19. – DOI 10.17308/meps/2078-9017/2023/2/8-19. – EDN QGJBJO.

32. Вагина Т. А. Продуктивность болотных, луговых, солончаковых и степных фитоценозов Барабинской колочной лесостепи / Т. А. Вагина, А. А.

Титлянова // Тезисы докладов V делегатского съезда Всесоюзного ботанического общества, Киев, 01 января – 31 1973 года. – Киев: Без издательства, 1973. – С. 257-258. – EDN YQEECL.

33. Васильев Г. В. Сбор данных о погоде через API Openweather / Г. В. Васильев, В. Д. Бердонос, А. В. Васильев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 86-88. – DOI 10.17084/978-5-7765-1502-6-2022-86. – EDN HMSCAI.

34. Вегетационные индексы // Геоматика. – 2011. – № 2. – С. 98-102. – EDNSTYTLN.

35. Вещество в степных геосистемах / В. А. Снытко, Ю. М. Семенов, Н. Д. Давыдова [и др.]; Академия наук СССР. Сибирское отделение. Институт географии. – Новосибирск: Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука", 1984. – 160 с. – EDN RUMUOL.

36. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий / Ф. В. Ерошенко, С. А. Барталев, Н. Г. Лапенко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 7. – С. 53-66. – DOI 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66. – EDN YUPLBJ.

37. Воронежской опытной станции по многолетним травам - 100 лет: основные итоги и перспективы работы / В. М. Косолапов, С. В. Сапрыкин, И. С. Иванов, А. В. Чекмарева // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: Сборник научных трудов. Том 23 (71). – Москва: Угрешская типография, 2020. – С. 9-21. – DOI 10.33814/МАК-2020-23-71-9-21. – EDN BVNTGM.

38. Восстановление и режим сохранения луговых степей в Центрально-Черноземном биосферном заповеднике / Н. А. Малешин, Н. И. Золотухин, Т. Д. Филатова [и др.] // Степной бюллетень. – 2000. – № 8. – С. 26-29. – EDN НРКНТГ.

39. Геоморфологическое районирование СССР / А.А. Григорьев, К. К. Марков: под ред. А.А. Григорьева и К.К. Маркова. – М., Д., 1947.

40. Гордеева В. А. Фитомасса и темпы ее разложения в травяных сообществах в условиях техногенного загрязнения почвы: специальность 03.02.08 "Экология (по отраслям)": диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Гордеева Валентина Андреевна, 2018. – 228 с. – EDN ORFSHN.

41. ГОСТ Р 53228-2008. Весы неавтоматического действия. Часть 1. Метрологические и технические требования. Испытания. – Введ. 2013-01-01. – М. Изд-во стандартов, 2013. – 252 с.

42. Губанова А. И. Анализ ландшафтных и агроландшафтных особенностей Воронежской области / А. И. Губанова, О. С. Барышникова, В. Д. Постолов // Модели и технологии природообустройства (региональный аспект). – 2017. – № 2(5). – С. 81-85. – EDN YQDDNU.

43. Гусев А. П. Многолетние тренды NDVI как индикатор состояния ландшафтов / А. П. Гусев // Географические исследования в контексте социально-экономического развития регионов, Грозный, 26–27 мая 2023 года / ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова». – Грозный: Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова, 2023. – С. 120-122. – DOI 10.36684/96-1-2023-120-122. – EDN CEALDZ.

44. Гусев А. П. Тренды продуктивности природных и антропогенных экосистем в Белорусском Полесье в условиях меняющегося климата / А. П. Гусев // Биосфера. – 2024. – Т. 16, № 1. – С. 84-90. – DOI 10.24855/biosfera.v16i1.898. – EDN RSXQSN.

45. Гусев А.П. Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7 (17). № 2. С. 202-209

46. Гуцаки М. А. Изучение возможности использования различных типов данных дистанционного зондирования Земли для вычисления вегетационного индекса NDVI / М. А. Гуцаки, И. В. Данилюк // Земля Беларуси. – 2020. – № 4. – С. 20-25. – EDNGYTHLI.

47. Динамика надземной фитомассы косимой луговой степи в Центрально-Черноземном заповеднике (1970-2019 годы) / Г. А. Рыжкова, О. В. Рыжков, В. Д. Собакинских, И. В. Рыжкова // Мониторинг природных экосистем Центрально–Черноземного заповедника: Труды Центрально–Черноземного государственного заповедника / Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник имени профессора В. В. Алехина. Том Выпуск 20. – пос. Заповедный: Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник имени профессора В. В. Алехина, 2021. – С. 145-151. – EDN KHLIOO.

48. Динамика надземной фитомассы некосимой луговой степи в Центрально-Черноземном заповеднике (1970-2019 годы) / Г. А. Рыжкова, О. В. Рыжков, В. Д. Собакинских, И. В. Рыжкова // Мониторинг природных экосистем Центрально–Черноземного заповедника: Труды Центрально–Черноземного государственного заповедника / Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник имени профессора В. В. Алехина. Том Выпуск 20. – пос. Заповедный: Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник имени профессора В. В. Алехина, 2021. – С. 152-155. – EDN KXOSTG.

49. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. Версия 1.0 / И. О. Алябина, В. А. Андроханов, В. В. Вершинин [и др.]. – Москва: Гриф и К, 2014. – 768 с. – ISBN 978-5-8125-1960-5. – EDN TNAMEB.

50. Ерошенко Ф. В. Использование данных дистанционного зондирования Земли для оценки состояния и степени деградации

естественных пастбищных угодий / Ф. В. Ерошенко, Н. Г. Лапенко, И. Г. Сторчак // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5(73). – С. 14-17. – DOI 10.25930/90j5-rc11. – EDN VLMWWW.

51. Жукова Е. Ю., Барсукова И. Н., Жуков А. А. Продуктивность кормовых угодий по данным Terra MODIS // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2019. Т. 49. № 4. С. 32-41. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-4-4

52. Заров Е. А. Основы работы в программе Quantum-GIS: Учебно-методическое пособие / Е. А. Заров. – Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2018. – 34 с. – ISBN 978-5-9611-0133-1. – EDN YUYNFJ.

53. Затулей К. С. Климатические ресурсы Воронежской области/К. С. Затулей // Географические аспекты охраны природы: сборник статей. – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 1990. – С. 85-99.

54. Захарян Ю. Г. Перспективы использования геостатистики для анализа состояния растений по данным дистанционного зондирования Земли / Ю. Г. Захарян, А. А. Комаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 140-148. – DOI 10.21046/2070-7401-2019-16-3-140-148. – EDN MNTFDI.

55. Зоотехнический анализ кормов / Л. Н. Дулепинских, Л. В. Сычева, О. Ю. Юнусова, А. Н. Попов; Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д. Н. Прянишникова. – Пермь: ИПЦ Прокрость, 2022. – 91 с. – ISBN 978-5-94279-569-6. – EDN SFSMGJ.

56. Ипатов В. С. Геоботаника: учебник / В. С. Ипатов, Л. А. Кирикова, Д. М. Мирин; В. С. Ипатов, Л. А. Кирикова, Д. М. Мирин; Санкт-Петербургский гос. ун-т. – Санкт-Петербург: Изд-во С.- Петербургского ун-та, 2010. – ISBN 978-5-288-04987-3. – EDN QKTOVT.

57. Ипатов В. С. Некоторые аспекты изучения функциональной структуры луговых фитоценозов / В. С. Ипатов, В. Х. Лебедева, М. Ю. Тиходеева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 1-5. – С. 1252-1256. – EDN RBFQVJ.

58. Ипатов В. С. Об использовании параметрических критериев для оценки "достоверности" параметров исследуемых объектов / В. С. Ипатов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 3. Биология. – 2014. – № 1. – С. 75-81. – EDN SBVBXZ.

59. Ипатов В. С. Описание фитоценоза: методические рекомендации: [учебно-методическое пособие для студентов, специализирующихся в области ботаники и экологии] / В. С. Ипатов, Д. М. Мирин; В. С. Ипатов, Д. М. Мирин; Санкт-Петербургский гос. ун-т, Каф.геоботаники и экологии растений. – Санкт-Петербург: [б. и.], 2008. – 70 с. – ISBN 978-5-9651-0332-4. – EDN QKSNOX.

60. Исследование пространственно-временной динамики растительных сообществ речной поймы трансграничной реки Аргунь (Хайлар) с использованием спектральных вегетационных индексов EVI по данным дистанционного зондирования MODIS / К. А. Курганович, А. В. Шаликовский, Л. Н. Зима [и др.] // Водные ресурсы и водопользование: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Чита, 20–21 мая 2021 года / Отв. редактор К.А. Курганович. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2021. – С. 61-68. – EDN JUXVBZ.

61. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года по Воронежской области. Земельные ресурсы и их использование / Статистический бюллетень, Воронежстат – Воронеж, 2018. – 124 с.

62. Казанцева, Т. И. Особенности восстановления залежной растительности луговых степей Центрального Черноземья (Воронежская область) / Т. И. Казанцева, Н. И. Бобровская, В. В. Тищенко // Аридные экосистемы. – 2010. – Т. 16, № 2(42). – С. 76-86. – EDN MUXNEH.

63. Калганов А. А. Динамика вегетационного индекса луговых фитоценозов прибрежной территории озера Четвертое / А. А. Калганов // Реализация приоритетных программ развития АПК: Сборник научных трудов по итогам X Международной научно-практической конференции, посвященная памяти заслуженного деятеля науки РФ и КБР, профессора Бориса Хажмуратовича Жерукова, Нальчик, 24–26 ноября 2022 года. Том Часть II. – Нальчик: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова", 2022. – С. 291-294. – EDN HZNNSD.

64. Кирсанов А. Д. Использование индекса NDVI для оценки развития многолетних трав в условиях пространственно-временной неоднородности на торфяных почвах / А. Д. Кирсанов, А. А. Комаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2024. – Т. 21, № 2. – С. 143-155. – DOI 10.21046/2070-7401-2024-21-2-143-155. – EDN IRТОКР.

65. Кирсанов А. Д. Оценка развития растительного покрова многолетних трав на основании сопряженных наземных измерений и данных дистанционного зондирования / А. Д. Кирсанов, А. Ф. Петрушин, А. А. Комаров // Применение средств дистанционного зондирования земли в сельском хозяйстве, Санкт-Петербург, 26–28 сентября 2018 года. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2018. – С. 248-257. – DOI 10.25695/agrophysica.2018.2.18806. – EDN GNBHEO.

66. Киселева К. В. Флора средней полосы России: атлас-определитель / К. В. Киселева, С. Р. Майоров, В. С. Новиков; под ред. В. С. Новикова. – Москва: Фитон+, 2010. – 544 с. – ISBN 978-5-93457-307-3. – EDN QKSNUH.

67. Комаров А. А. Оценка состояния травостоя с помощью вегетационного индекса NDVI / А. А. Комаров, А. А. Комаров // Известия

Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 51. – С. 124-129. – EDN DXKYTI.

68. Комаров А. А. Сравнительная характеристика различных вегетационных индексов при оценке состояния растительного покрова кормовых трав / А. А. Комаров, А. Д. Кирсанов, С. Н. Малашин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2(63). – С. 18-29. – DOI 10.24412/2078-1318-2021-2-18-29. – EDN LUKMNC.

69. Костин С. И. Климат Центрального Черноземья / С. И. Костин. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 1971. – 202 с. – EDNVUUAIZ.

70. Костин С. И. Радиационный, тепловой и водный баланс почвенно-растительных провинций центрально-черноземной полосы / С. И. Костин // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 1970. – № 263. – С. 89 – 106. – EDN YRMWQV.

71. Куликов Ю. А. Анализ региональных особенностей сезонной динамики продуктивности хозяйственно ценных биоценозов Воронежской области / Ю. А. Куликов, Е. А. Высоцкая // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2024. – Т. 20, № 1. – С. 130-135. – EDN KVAMZA.

72. Куликов Ю. А. Мультиспектральная съемка как инструмент дистанционного мониторинга состояния растительности природных территорий и агроландшафтов / Ю. А. Куликов, Е. В. Куликова // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 01 апреля – 31 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 152-157. – EDN JFCEUC.

73. Куликов Ю. А. Оценка перспектив сельскохозяйственного использования биологического ресурса лугово-пастбищных биоценозов Воронежской области [Электронный ресурс] / Ю. А. Куликов, Е. А. Высоцкая // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал

– 2023. – № 6(60). – Режим доступа: [https://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/6/st\\_625.pdf](https://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/6/st_625.pdf) – DOI 10.51419/202136625. – EDN RRFUGB.

74. Куликов Ю. А. Прогнозирование питательности продукции фитоценозов как основа сельскохозяйственной оценки биоресурсного потенциала луговых территорий / Ю. А. Куликов, Е. А. Высоцкая // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2024. – Т. 20, № 2. – С. 73-79. – EDN JUNNAG.

75. Куликов Ю. А. Теоретические основы мониторинговых исследований флористического компонента биоценозов Воронежской области / Ю. А. Куликов, Е. А. Высоцкая // Теория и практика инновационных технологий в АПК: Материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 10 апреля – 16 2024 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2024. – С. 22-26. – EDN GUYMSV.

76. Куликов Ю. А. Цифровые технологии как инструмент оценки функционирования биоресурсов сенокосов и пастбищ / Ю. А. Куликов, Е. А. Высоцкая // Вызовы и инновационные решения в аграрной науке : Материалы XXVIII Международной научно-производственной конференции, Майский, 10–11 июня 2024 года. – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 204-205. – EDN JQTTZR.

77. Курганович К. А. Исследование отклика растительных сообществ поймы р. Аргунь на изменение речного стока с использованием спектральных вегетационных индексов по данным дистанционного зондирования MODIS / К. А. Курганович, А. В. Шаликовский // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: Материалы XX Международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Чита, 30 ноября – 04 2020 года. Том Часть III. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2020. – С. 104-107. – EDNWLMGUJ.

78. Лазарев Н. Н. Луговое хозяйство с основами кормопроизводства / Н. Н. Лазарев, В. А. Тюлин, Е. А. Савенкова. – Москва: Издательство Тверской ГСХА, 2021. – 171 с. – ISBN 978-5-9675-1825-6. – EDN ZJLXKA.

79. Лазарев Н. Н. Луговые экосистемы / Н. Н. Лазарев, В. А. Тюлин. – Москва: Издательство Тверской ГСХА, 2020. – 152 с. – ISBN 978-5-9675-1781-5. – EDN WOCNSE.

80. Лакин Г. Ф. Биометрия: учебное пособие для биологических специальностей ВУЗов / Г. Ф. Лакин. – 4-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Издательство "Высшая Школа", 1990. – 352 с. – ISBN 5-06-000471-6. – EDN NRSJMF.

81. Лапенко Н. Г. Продуктивность природных кормовых угодий и данные дистанционного зондирования Земли / Н. Г. Лапенко, Ф. В. Ерошенко, И. Г. Сторчак // Степи Северной Евразии: материалы VIII международного симпозиума, Оренбург, 10–13 сентября 2018 года / Российская академия наук Уральское отделение, Институт степи; Русское географическое общество; Российский фонд фундаментальных исследований; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Оренбургский государственный университет; Северо-Казахстанский государственный университет. – Оренбург: Институт степи Уральского отделения Российской академии наук, 2018. – С. 552-555. – EDN VJLYSQ.

82. Лиджиева Л. Ц. Опыт применения индекса вегетации (NDVI) для определения биологической продуктивности фитоценозов аридной зоны на примере региона черные земли / Л. Ц. Лиджиева, С. С. Уланова, Н. Л. Федорова // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 94-96. – EDN PEKUJB.

83. Луговые экосистемы в биосфере, агроландшафтах и сельском хозяйстве России и мира / Л. С. Трофимова, В. М. Косолапов, И. А. Трофимов, Е. П. Яковлева // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3-3. – С. 528-532. – EDN RZMCSF.

84. Маевский П. Ф. Флора средней полосы европейской части России: учебное пособие для биологических факультетов университетов, педагогических и сельскохозяйственных вузов / П. Ф. Маевский. – 11-е издание. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Товарищество научных изданий КМК, 2014. – 635 с. – ISBN 978-5-87317-958-9. – EDN QJDEED.

85. Мандах У. Пастбищная дигрессия в степях северной части Центральной Монголии: специальность 03.02.01 "Ботаника": диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Мандах Уртнасан, 2016. – 167 с. – EDN QAGKLZ.

86. Материалы по оценке производительных сил муниципальных районов Воронежской области (агроклиматические, водные и рекреационно-туристские ресурсы) / Л. М. Акимов, В. Л. Бочаров, В. А. Дмитриева [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2014. – № 4. – С. 68-126. – EDN TGDMAТ.

87. Методические указания по выполнению курсового проекта по луговому кормопроизводству: для самостоятельной работы студентов очного отделения. – Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н. В. Парахина, 2004. – 22 с. – EDN CKZUVP.

88. Методы полевых экологических исследований. – Саранск; Пушта: Мордовский государственный природный заповедник им. П.Г. Смидовича, 2014. – 408 с. – EDN TOXKRL.

89. Михалев С. С. Кормопроизводство: Учебное пособие для подготовки бакалавров, обучающихся по направлению 35.03.04 (110400) «Агрономия» / С. С. Михалев, Н. Н. Лазарев. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2020. – 220 с. – ISBN 978-5-16-106491-7. – EDN QCPQWQ.

90. Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: средообразующие функции кормовых растений и экосистем / Российская академия сельскохозяйственных наук, Всероссийский научно-

исследовательский институт кормов им. В.Р. Вильямса. Том Выпуск 2 (50). – Москва: Угрешская типография, 2014. – 139 с. – ISBN 978-5-91850-094-1. – EDN RZNVWB.

91. Морозов В. А. Зоотехнический анализ и оценка питательности кормов, используемых в кормлении высокопродуктивных коров / В. А. Морозов, Е. Н. Охохонина, Е. Н. Булыгина // Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, Курган, 27 февраля 2020 года / Под общей редакцией Миколайчика И.Н.. – Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2020. – С. 540-544. – EDN LNHEOZ.

92. Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ Республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ / А. Н. Золотокрылин, Т. Б. Титкова, С. С. Уланова, Н. Л. Федорова // Аридные экосистемы. – 2013. – Т. 19, № 4(57). – С. 31-39. – EDNROMLVJ.

93. Ненароков М. И. Сенокосы и пастбища Воронежской области. – Воронеж: Кн. изд-во, 1959. – 144 с.

94. Ненароков М. И. Сенокосы и пастбища областей Центрально-Черноземной полосы (Природные особенности, хозяйственное состояние, улучшение и использование их): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата сельскохозяйственных наук / М. И. Ненароков. – Воронеж, 1965. – 42 с. – EDN ZMCYAB.

95. Овчарова Н. В. Динамика луговой растительности на территории Косихинского района (Алтайский край) / Н. В. Овчарова, Т. А. Терехина // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 11(61). – С. 38-43. – EDN KWBCMR.

96. Овчарова Н. В. Продуктивность надземной фитомассы травяных сообществ Алтайского края в ходе восстановительной сукцессии / Н. В.

Овчарова, Т. А. Терехина // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2014. – № 13. – С. 148-152. – EDN TBVAAD.

97. Опыт и перспективы изучения фитомассы с помощью серии карт полей / В. А. Снытко, В. А. Червяков, Г. Н. Мартьянова, Д. Г. Нефедьева // Геоботаническое картографирование. – 1977. – № 1977. – С. 33-40. – EDN GPBWKW.

98. Оценка коренного улучшения лугов, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  / И. Н. Белоус, Д. Н. Прищеп, Ю. А. Анишина, Е. В. Смольский // Аграрная наука. – 2011. – № 12. – С. 11-13. – EDN ONZBXD.

99. Оценка природных растительных сообществ с использованием данных дистанционного зондирования Земли в условиях степей Ставропольского края / Ф. В. Ерошенко, Н. Г. Лапенко, И. Г. Сторчак [и др.] // Инженерные технологии и системы. – 2022. – Т. 32, № 3. – С. 390-409. – DOI 10.15507/2658-4123.032.202203.390-409. – EDN TMCRJH.

100. Оценка состояния растительности: луга и тундры: учебно-методическое пособие / Т. А. Радченко, Л. М. Морозова, Д. В. Веселкин, Ю. С. Федоров; научный редактор: Г. И. Махонина; Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2016. – 86 с. – ISBN 978-5-7996-1897-1. – EDN XGONVX.

101. Пехота А. П. Влияние известкования торфяных почв низинного типа на продуктивность лугового травостоя / А. П. Пехота // Мелиорация. – 2014. – № 2(72). – С. 72-77. – EDN VDESKD.

102. Пехота А. П. Накопление биомассы травянистой растительности в пойменном фитоценозе / А. П. Пехота, С. М. Мижуй, Ю. Ю. Лещинская // Вестник Мозырского государственного педагогического университета им. И.П. Шамякина. – 2013. – № 4(41). – С. 42-48. – EDN QZIGLV.

103. Поверхностное улучшение пойменных и суходольных лугов / Н. Г. Андреев, Н. Н. Лазарев, Ю. Г. Ермолаев, Н. Ф. Кушнир // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 1987. – № 4. – С. 20-26. – EDN KOKUCJ.

104. Показатели плодородия черноземов различных угодий / А. Б. Беляев, Д. И. Щеглов, Л. И. Брехова, И. К. Головешкина // Почвоведение - продовольственной и экологической безопасности страны: тезисы докладов VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева и Всероссийской с международным участием научной конференции, Белгород, 15–22 августа 2016 года. Том Часть 1. – Белгород: Издательский дом "Белгород", 2016. – С. 57-58. – EDN XDVBXN.

105. Порабейкина О. О. Использование вегетационных индексов для изучения пространственной структуры растительных сообществ участка «Камызякская степь с озером «Улук-Коль» Государственного природного заповедника «Хакасский» / О. О. Порабейкина // Современное состояние и проблемы сохранения биоресурсов: Материалы Международной научно-практической конференции, Майкоп, 24 ноября 2023 года. – Майкоп: Магарин О.Г., 2023. – С. 108-114. – DOI 10.47370/978-5-00238-028-2-2023-108-114. – EDN IFZDVX.

106. Пояркова Н. М. Флористический состав и хозяйственная ценность лугового фитоценоза / Н. М. Пояркова // Аграрное образование и наука. – 2019. – № 4. – С. 30. – EDN PLCKFM.

107. Прогнозирование биологической продуктивности пастбищных угодий и оптимизация технологической нагрузки для различных половозрастных групп пастбищных животных: Методические рекомендации / Т. С. Лесняк, С. А. Олейник, С. А. Проказин, Д. Б. Литвин. – Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, 2022. – 36 с. – EDN OWRRSI.

108. Раменский Л.Г. Избранные работы. Проблемы и методы изучения растительного покрова / Л.Г. Раменский. – Л.: Наука, Ленингр. отделение, 1971. – 336 с.

109. Растительность луговых степей Центрального Черноземья (Каменная степь) и ее динамика / Н. И. Бобровская, Т. И. Казанцева, А. И. Пащенко, В. В. Тищенко // Ботанический журнал. – 2018. – Т. 103, № 3. – С. 382-395. – DOI 10.1134/S0006813618030079 . – EDN YSSPDC.

110. Рациональное природопользование и кормопроизводство в сельском хозяйстве России / В. М. Косолапов, И. А. Трофимов, Л. С. Трофимова, Е. П. Яковлева; Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В.Р. Вильямса. – Москва: Российская академия наук, 2018. – 132 с. – ISBN 978-5-906906-73-1. – EDN XUEEYX.

111. Ресурсный потенциал флоры Дивногорья / В. А. Агафонов, Б. К. Ганнибал, Е. С. Казьмина, Т. Н. Чернышова // Дивногорский сборник: Труды музея-заповедника "Дивногорье". Материалы научной конференции, Воронеж-Дивногорье, 29–30 июля 2021 года. Том Выпуск 8. – Воронеж: Полиграфический центр "Пресс-Бургер", 2021. – С. 10-14. – EDN KGZHQF.

112. Розенберг Г. С. Количественные методы фитоценологии в работах Б. М. Миркина и их современное состояние / Г. С. Розенберг // Фиторазнообразии Восточной Европы. – 2018. – Т. 12, № 3. – С. 31-54. – DOI 10.24411/2072-8816-2018-10024. – EDN YOVLUL.

113. Рулев А. С. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области / А. С. Рулев, С. Н. Канищев, С. С. Шинкаренко // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 4. – С. 113-123. – DOI 10.21046/2070-7401-2016-13-20-113-123. – EDN WMIXJP.

114. Рыжкова Г. А. Динамика надземной фитомассы луговой степи в Центрально-Черноземном заповеднике (1970-2015 гг.) / Г. А. Рыжкова, В. Д. Собакинских, О. В. Рыжков // Научные исследования в заповедниках и национальных парках России: Тезисы Всероссийской научно-практической

конференции с международным участием, посвященной 25-летию биосферного резервата ЮНЕСКО "Национальный парк "Водлозерский", Петрозаводск, 29 августа – 04 2016 года / Ответственные редакторы В.Н. Мамонтов, О.О. Предтеченская. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. – С. 196-197. – EDN VVYJLQ.

115. Рязанов С. С. Обзор российских и иностранных источников мультиспектральных снимков для создания систем агроэкологического мониторинга / С. С. Рязанов, В. И. Кулагина // Российский журнал прикладной экологии. – 2024. – № 2(38). – С. 4-18. – DOI 10.24852/2411-7374.2024.2.04.18. – EDN АНУТSW.

116. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621868 Российская Федерация. Количественная характеристика надземной фитомассы луговой травянистой растительности в параллельном измерении со значениями спектрального вегетационного индекса NDVI / Ю. А. Куликов, Е. А. Высоцкая, Е. В. Куликова; заявитель и правообладатель Ю. А. Куликов. – Заявл. 21.04.2024; опубл. 02.05.2024 – EDNVTRWSD.

117. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022685480 Российская Федерация. АгроСигнал.Эксперт: № 2022681780: заявл. 11.11.2022; опубл. 23.12.2022 / В. Г. Коршунов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ИнфоБиС". – EDN AWRBEV.

118. Сердюков А. П. Эффективность возделывания многолетних трав пойменных кормовых угодий / А. П. Сердюков, Л. П. Батуро, Е. В. Смольский // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 2-2. – С. 46-50. – EDN TRZNMD.

119. Сиразиев Р. З. Видовой состав и запасы надземной фитомассы степных сообществ / Р. З. Сиразиев, И. Б. Санданова, Б. З. Базарон // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. – 2012. – № 6. – С. 33–41.

120. Смольский Е. В. Эффективность систем удобрения при улучшении естественных кормовых угодий / Е. В. Смольский, Н. Н. Бокатуро, А. Г. Агешин // Агрохимикаты в XXI веке: теория и практика

применения: материалы международной научно-практической конференции, Нижний Новгород, 31 мая – 02 2017 года. – Нижний Новгород: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия", 2017. – С. 128-131. – EDN YPFBDV.

121. Снытко В. А. Опыт сравнительного изучения заповедных и используемых степных геосистем / В. А. Снытко, Л. Г. Нефедьева, С. С. Дубынина // География и природные ресурсы. – 1983. – № 1. – С. 61-68. – EDN XMQNBR.

122. Снытко В. А. Пространственно-временные изменения фитомассы в геосистемах Назаровской котловины / В. А. Снытко, Л. Г. Нефедьева, С. С. Дубынина // География и природные ресурсы. – 1985. – № 4. – С. 109-118. – EDN UOHYKY.

123. Состояние сельского хозяйства Воронежской области. Аналитический материал за январь – сентябрь 2023 года [Электронный ресурс] / Воронежстат – Воронеж, 2023. – Режим доступа: <https://36.rosstat.gov.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.

124. Сочава В. Б. Опыт учета полной продуктивности надземной части травяного покрова / В. Б. Сочава, В. В. Липатова, А. А. Горшкова // Ботанический журнал. – 1962. – Т. 47, № 4. – С. 473–484.

125. Справочник по кормопроизводству. – 5-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Российская академия сельскохозяйственных наук, 2014. – 717 с. – ISBN 978-5-906592-21-7. – EDN SJYLED.

126. Сурков И. М. Анализ развития малых форм хозяйствования на селе Воронежской области и их роль в производстве продукции животноводства / И. М. Сурков, А. В. Ануфриева // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4(47). – С. 280-286. – EDN VAUAXZ.

127. Сурков И. М. Комплексный анализ производства продукции животноводства в малых формах хозяйствования Воронежской области / И. М. Сурков, А. В. Ануфриева // Инновационные направления развития технологий и технических средств механизации сельского хозяйства: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета имени императора Петра I, Воронеж, 25 декабря 2015 года / Министерство сельского хозяйства РФ; Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. Том Часть II. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2015. – С. 256-263. – EDN VWJKGB.

128. Титлянова А. А. Устойчивость травяных экосистем / А. А. Титлянова // Сибирский экологический журнал. – 2009. – Т. 16, № 2. – С. 237-243. – EDN KJAOXN.

129. Титлянова А. А. Чистая первичная продукция степных экосистем и причины ее пространственной изменчивости / А. А. Титлянова, Е. К. Вишнякова, Е. Н. Смоленцева // Почвоведение. – 2024. – № 3. – С. 428-438. – DOI 10.31857/S0032180X24030046. – EDN YIVFWV.

130. Трофимов И. А. Природные кормовые угодья России / И. А. Трофимов, Л. С. Трофимова, Е. П. Яковлева // Использование и охрана природных ресурсов в России. – 2022. – № 2(170). – С. 76-89. – EDN JDTLIZ.

131. Тюльдюков В. А. Заготовка кормов высокого качества из многолетних трав / В. А. Тюльдюков, Н. Н. Лазарев // Кормопроизводство. – 1995. – № 2. – С. 40-44. – EDN VISZQP.

132. Управление продуктивностью естественных кормовых угодий / А. Л. Силаев, Е. В. Смольский, И. Н. Белоус, В. Ф. Шаповалов // Вестник Брянской ГСХА. – 2024. – № 1(101). – С. 3-8. – EDN ZVDZRG.

133. Уртнасан М. Пастбищная дигрессия в сухих степях Северной части Центральной Монголии / М. Уртнасан, Е. Л. Любарский // Проблемы

ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2015. – № 14. – С. 115-117. – EDN UJHUZD.

134. Фенология (методика наблюдений) / Д. В. Тишин, Н. А. Чижикова. – Казань: Казанский федеральный университет, 2022. – 36 с.

135. Физико-географическое районирование Центральных Черноземных областей / Н. И. Ахтырцева, З. П. Бердникова, Г. Е. Гришанков [и др.]; под ред. проф. Ф. Н. Милькова. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1961. – 263 с.

136. Физическая география / А. Ю. Черемисинов, О. П. Семенов, С. В. Хруцкий, В. А. Мукосеев. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2011. – 132 с. – EDN SMQJXB.

137. Флора и растительность Центрального Черноземья – 2013: Материалы межрегиональной научной конференции, Курск, 06 апреля 2013 года / Редакционная коллегия: О. В. Рыжков (ответственный редактор), Н. И. Золотухин, И. Б. Золотухина, А. В. Полуянов, Т. Д. Филатова. – Курск: Без издательства, 2013. – 237 с. – ISBN 978-5-98916-084-6. – EDN SJRWFX.

138. Флора и растительность Центрального Черноземья – 2024: Материалы межрегиональной научной конференции, Курская обл., Курский р-н, пос. Заповедный, 20 апреля 2024 года. – Курск: Центрально-Черноземный государственный природный биосферный заповедник им. проф. В. В. Алехина, 2024. – 201 с. – ISBN 978-5-6045709-5-1. – EDN VIYKDC.

139. Флористическое разнообразие: изучение, охрана и рациональное использование: Учебно-методическое пособие для вузов / Министерство образования и науки РФ; ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет»; Составители: В. А. Агафонов, Л. Н. Скользнева. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2013. – 43 с. – EDN TMSEWT.

140. Хлебникова Е. И. Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России / Е. И. Хлебникова, И. А. Салль // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 7. – С. 5-13. – EDN KVKYAJ.

141. Хруцкий С. В. Формы первичной гидрографической сети, их генезис и проблемы типизации / С. В. Хруцкий, О. П. Семенов, Э. В. Косцова // Геоморфология. – 1998. – № 4. – С. 85-91. – EDN WGVYRT.

142. Шанцер И. А. Растения средней полосы Европейской России : полевой атлас / И. А. Шанцер; И. А. Шанцер. – 2-е изд., испр. и доп.. – Москва : Товарищество научных изданий КМК, 2007. – 471 с. – ISBN 978-5-87317-351-8. – EDN QKPNVT.

143. Шевченко В. Е. Состояние чернозёмов Воронежской области / В. Е. Шевченко, К. Е. Стекольников // Докучаевское наследие: сохранение и воспроизводство плодородия черноземных почв: Сборник научных докладов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 140-летию классического труда В.В. Докучаева "Русский чернозем", Каменная Степь, 19 октября 2023 года. – Воронеж: Издательство Истоки, 2023. – С. 146-151. – EDN POBIZW.

144. Шинкаренко С. С. Пространственно-временной анализ степных пожаров в Приэльтонье на основе данных ДЗЗ / С. С. Шинкаренко // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки. – 2015. – № 1(11). – С. 87-94. – DOI 10.15688/jvolsu11.2015.1.9. – EDN TSIKAJ.

145. Шмидт И. В. Применение данных дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / И. В. Шмидт, А. М. Латыпова, А. А. Царенко // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46, № 4. – С. 539-554. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554. – EDN HKSGGP.

146. Щеглов Д. И. Воронежская область / Д. И. Щеглов, А. Б. Беляев, Ю. И. Дудкин // Красная книга почв России: объекты книги и кадастра особо ценных почв: [монография] / Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова [и

др.]; науч. редакторы: Г. В. Добровольский, Е. Д. Никитин. – Москва: МАКС Пресс, 2009. – С. 71-78. – EDN YQTOXR.

147. Щеглов Д. И. Почвенный покров. Региональная специфика / Д. И. Щеглов, Т. А. Девятова, С. Н. Божко // Эколого-географический Атлас-книга Воронежской области / Русское географическое общество, Воронежский государственный университет. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2013. – С. 119-121. – EDN VHFENP.

148. Эколого-экономическая эффективность применения минеральных удобрений на радиационно-загрязненных естественных лугах Брянской области / И. Н. Белоус, Ю. А. Анишина, Д. Н. Прищеп, Е. В. Смольский // Достижения науки и техники АПК. – 2011. – № 12. – С. 43-46. – EDN OKKJST.

149. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова ; Н. В. Кобышева [и др.]; под ред. Н. В. Кобышевой, К. Ш. Хайруллина. – Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2005. – 319 с. – ISBN 5-286-01444-5. – EDN QQXMOD.

150. Эффективность мероприятий по улучшению продуктивности сенокосов / Е. В. Смольский, Л. П. Харкевич, С. Ф. Чесалин [и др.] // Агрехимический вестник. – 2015. – № 5. – С. 25-28. – EDN UIEDTP.

151. Яблонских Л. А. Проблемы использования и агроэкологический мониторинг пойменных земель Среднерусского Черноземья / Л. А. Яблонских, Б. П. Ахтырцев // Опыт и проблемы природопользования при реализации президентских программ в Центральном Черноземье России : материалы VI Международной научно-практической конференции, Воронеж, 26 декабря 2005 года / под общей редакцией П. С. Русинова; Федеральное агентство кадастра объектов недвижимости; Центрально-Черноземный филиал ФГУП "Госземкадастръёмка". Том Часть 1. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2006. – С. 127-131. – EDN ZUJEMJ.

152. Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago / H. Santin-Janin, M. Garel, J. L. Chapuis, D. Pontier // *Polar Biology*. – 2009. – Vol. 32, No. 6. – P. 861-871. – DOI 10.1007/s00300-009-0586-5. – EDN DWUPKI.

153. Epstein H.E., Walker D.A., Raynolds M.K., Kelley A.M., Jia G.J., Ping C.L., Michaelson G.J. Vegetation biomass, leaf area index, and NDVI patterns and relationships along two latitudinal transects in arctic tundra // Abstract GC31A-0697, presented at AGU Fall Meeting, San Francisco, CA. 2009. V. 90. P. GC31A-0697.

154. Geographic Information Systems in Forecasting the Winter Wheat Yield / A. Toigildin, Yu. Kulikov, I. Toigildina [et al.] // XIV International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2021”: Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry. Volume 1, Rostov-on-Don, 24–26<sup>th</sup> February 2021. Vol. 246. – Springer Verlag: Springer Verlag, 2022. – P. 322-329. – DOI 10.1007/978-3-030-81619-3\_36. – EDN UMSFTR.

155. Ghorbanzadeh O., Blaschke T., Didehban K., Rasouli H., Kamran K.V., Feizizadeh B. An application of Sentinel-1, Sentinel-2 and GNSS data for landslide susceptibility mapping // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. T. 9. № 10. C. 561. DOI: 10.3390/ijgi9100561

156. Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review / M. Amani, S. Mahdavi, A. Ghorbanian [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 13. – P. 5326-5350. – DOI 10.1109/JSTARS.2020.3021052. – EDN XEZMBP.

157. Gopp N. V. Relationships between the NDVI, Yield of Spring Wheat, and Properties of the Plow Horizon of Eluviated Clay-Illuviol Chernozems and Dark Gray Soils / N. V. Gopp, O. A. Savenkov // *Eurasian Soil Science*. – 2019. – Vol. 52, No. 3. – P. 339-347. – DOI 10.1134/S1064229319030050. – EDN RPNHNG.

158. Guo J., Zhu L., Jin B. Crop classification based on data fusion of Sentinel-1 and Sentinel-2 // *NongyeJixieXuebao*. 2018. T. 49. № 4. C. 192-198. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.022

159. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions // *Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc.* 1987. P. 103-107.

160. NDVI Characteristics and Influencing Factors of Typical Ecosystems in the Semi-Arid Region of Northern China: A Case Study of the Hulunbuir Grassland / Ya. Zhao, Ch. Hu, Xi. Dong, Ju. Li // *Land*. – 2023. – Vol. 12, No. 3. – P. 713. – DOI 10.3390/land12030713. – EDN MFBCUJ.

161. Phillips L. B., Hansen A. J., Flather C. H. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production // *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, p. 4381-4392.

162. Sentinel-2 User Handbook: ESA Standard Document, 2015. – Issue 5, Rev 2. – 64 p.

163. Serbina L. Landsat uses and benefits - Case studies by application area: U.S. Geological Survey Open-File Report / L. Serbina, H. M. Miller. - 2014. - 1108. - 61 p.

164. Spatial–Temporal Correlation Considering Environmental Factor Fusion for Estimating Gross Primary Productivity in Tibetan Grasslands / Q. Yang, N. Nie, Ya. Wang [et al.] // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – P. 6290. – DOI 10.3390/app13106290. – EDN QGNMUE.

165. The analysis of seasonal and long-term dynamics of the vegetative NDVI index in the territory of the State Nature Reserve "Nurgush" / T. A. Adamovich, G. Y. Kantor, T. Y. Ashikhmina, V. P. Savinykh // *Theoretical and Applied Ecology*. – 2018. – No. 1. – P. 18-24. – EDN XOTKSL.

166. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future

trends, and practical considerations / G.T. Yengoh, D. Dent, L. Olsson, A.E. Tengberg, C.J. Tucker. Lund: LUCSUS, 2014. - 80 p.

167. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F. The interpretation of N DVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover // In Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology, Brisbane, Australia. 1996. P. 57-61.

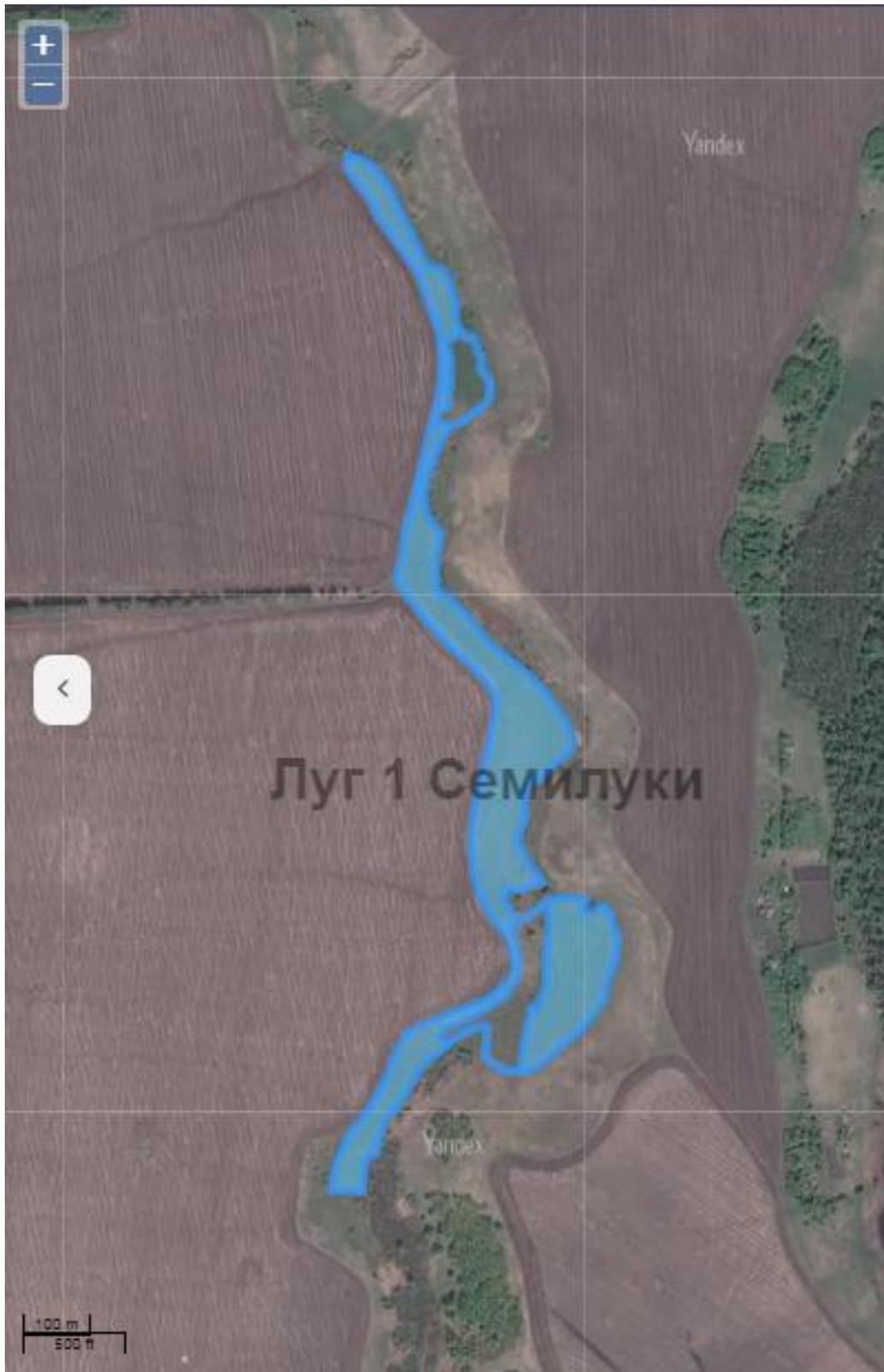
168. Valero S., Arnaud L., Planells M., Ceschia E. Synergy of Sentinel-1 and Sentinel-2 imagery for early seasonal agricultural crop mapping // Remote Sensing. 2021. T. 13.№23. DOI:10.3390/rs13234891

169. Vegetation Mapping in the Permafrost Region: A Case Study on the Central Qinghai-Tibet Plateau / D. Zou, G. Liu, E. Du [et al.] // Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14, No. 1. – DOI 10.3390/rs14010232. – EDN EHMIUR.

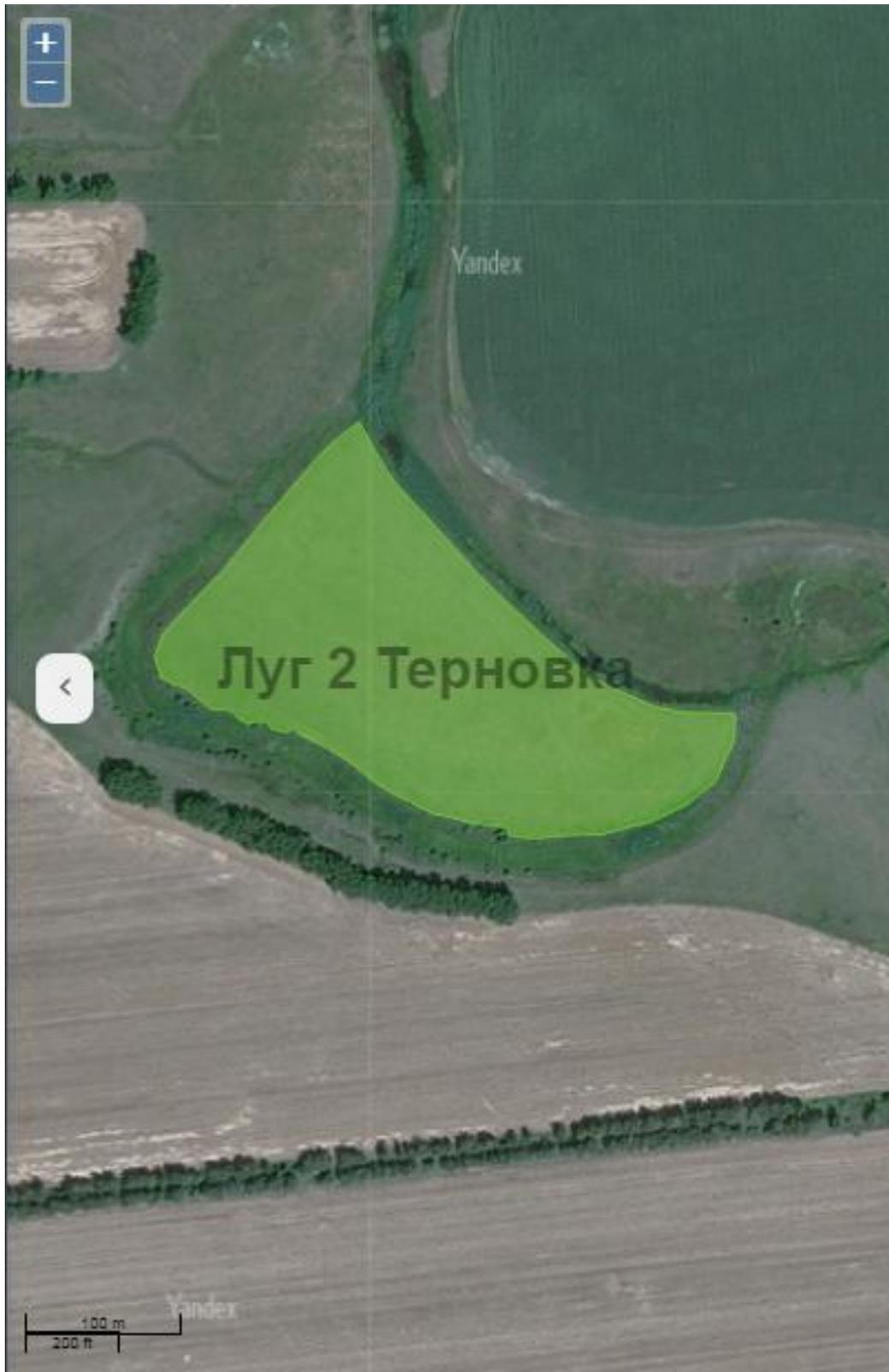
170. Yengoh G.T. et al. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations. LundUniversityCentreforSustainabilityStudies, LUCSUS, 2014, 80 p.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

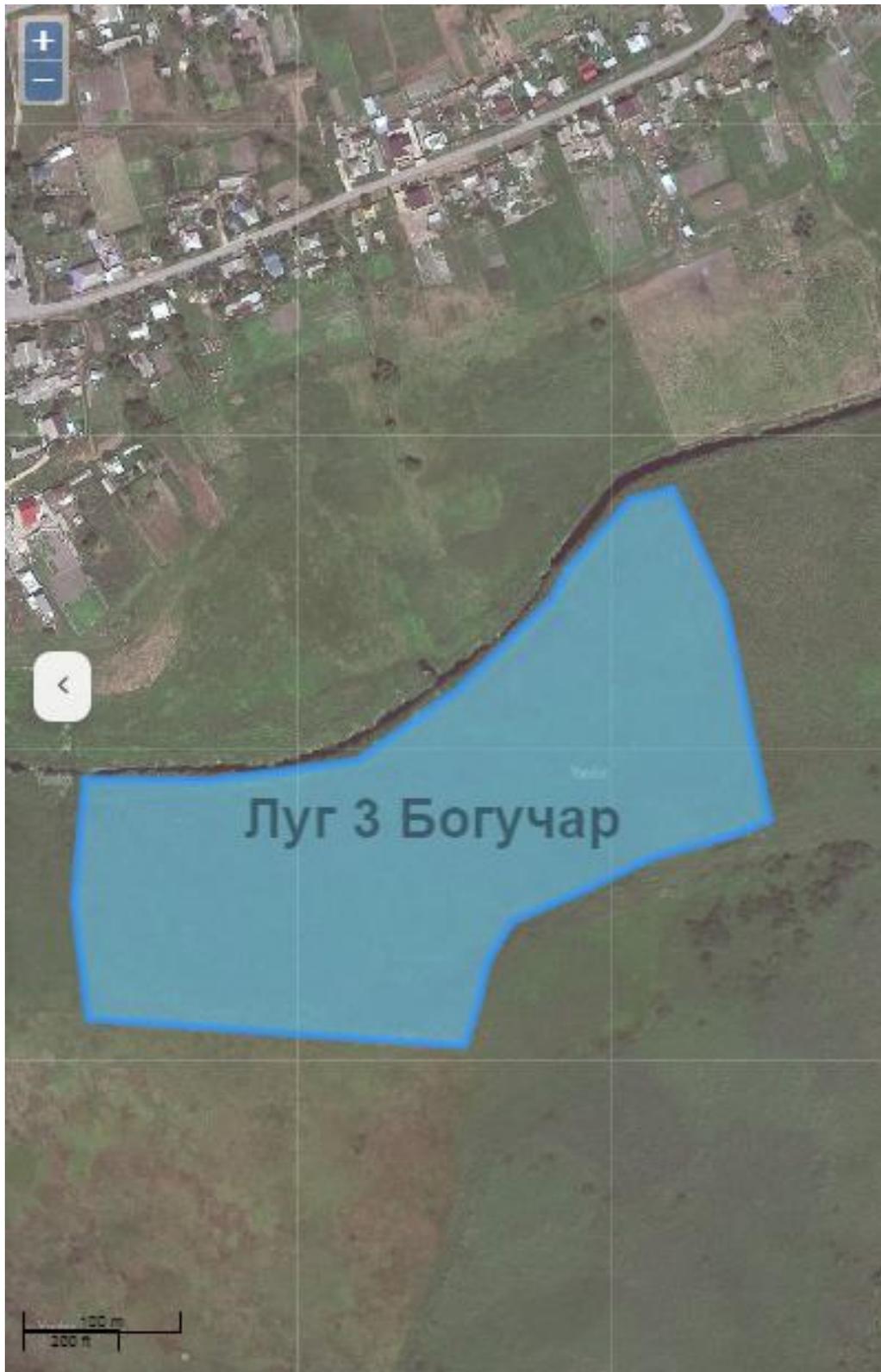
Карта-схема расположения участка №1



Карта-схема расположения участка №2



Карта-схема расположения участка №3



Карта-схема расположения участка №4



## Измеренные значения количества надземной фитомассы

Район расположения объекта исследования	Дата выполнения наблюдений	NDVI (на ближайшую дату)	Масса, кг/м <sup>2</sup>
Семилукский	25.04.2021	0,46	0,25
	17.05.2021	0,76	0,64
	15.06.2021	0,87	0,79
	20.06.2021	0,89	0,80
	28.09.2021	0,70	0,60
	01.05.2022	0,73	0,61
	08.05.2022	0,77	0,64
	23.06.2022	0,87	0,78
	24.08.2022	0,85	0,80
	16.04.2023	0,44	0,23
	28.04.2023	0,58	0,30
	19.05.2023	0,79	0,65
	05.06.2023	0,84	0,79
	11.08.2023	0,88	0,80
23.09.2023	0,75	0,65	
Терновский	26.04.2021	0,54	0,29
	25.05.2021	0,70	0,58
	09.06.2021	0,77	0,61
	15.09.2021	0,60	0,38
	30.04.2022	0,58	0,41
	14.05.2022	0,64	0,43
	05.06.2022	0,71	0,59
	28.04.2023	0,64	0,42
	03.05.2023	0,73	0,60
	02.06.2023	0,80	0,62
27.07.2023	0,69	0,58	
Богучарский	24.04.2021	0,51	0,54
	14.05.2021	0,71	0,90
	14.06.2021	0,91	1,11
	24.04.2022	0,59	0,60
	23.05.2022	0,74	0,95
	19.06.2022	0,87	0,98
	12.07.2022	0,65	0,83
	13.05.2023	0,55	0,58
	04.06.2023	0,83	0,96
23.06.2023	0,89	1,05	

Таловский	30.04.2021	0,33	0,21
	18.05.2021	0,75	0,79
	08.07.2021	0,85	0,82
	15.04.2022	0,68	0,71
	24.05.2022	0,91	0,88
	07.07.2022	0,91	0,85
	19.09.2022	0,78	0,82
	09.04.2023	0,55	0,43
	15.05.2023	0,90	0,85
	19.06.2023	0,65	0,49
	25.07.2023	0,57	0,48
	26.08.2023	0,77	0,81

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 26.04.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 03.05.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 28.05.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 11.04.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 06.05.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 07.06.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 03.04.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 03.05.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Семилукский район**



Дата съемки: 07.06.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 18.04.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 08.05.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 12.06.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 15.04.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 08.05.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 04.06.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 05.04.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 08.05.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Терновский район**



Дата съемки: 02.06.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

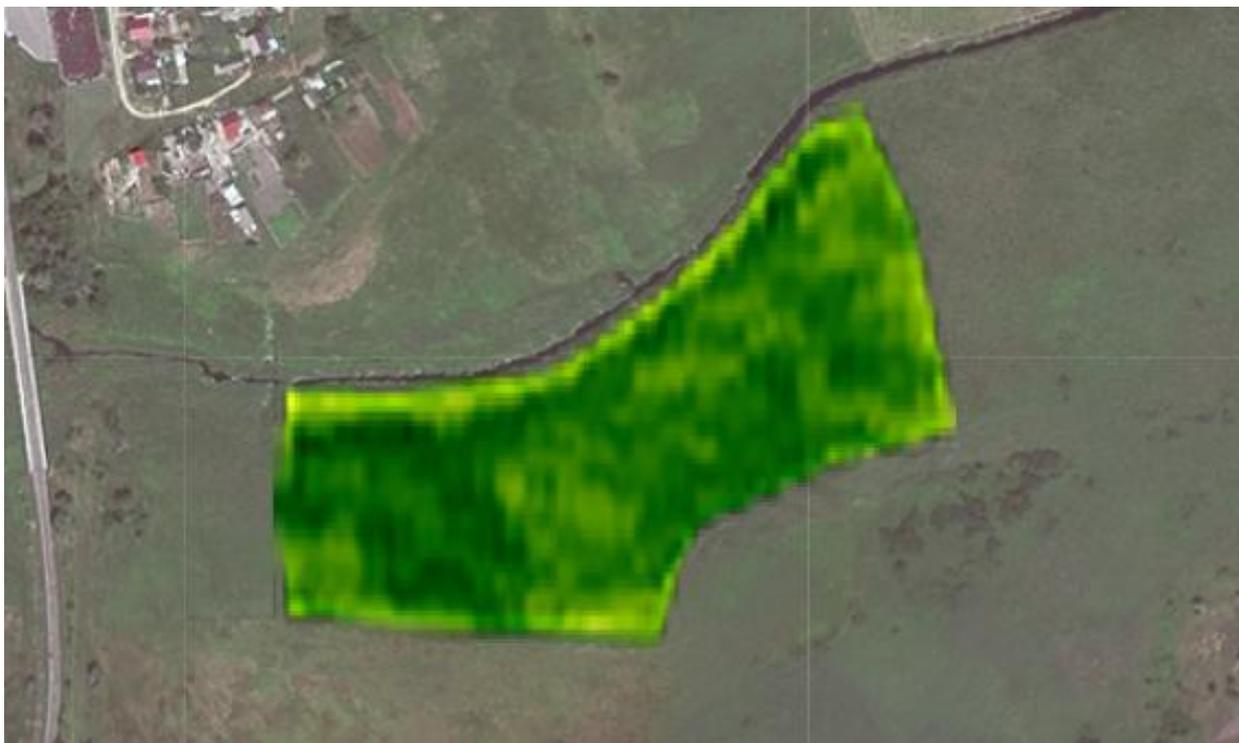
**Богучарский район**



Дата съемки: 18.04.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Богучарский район**



Дата съемки: 05.05.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Богучарский район**



Дата съемки: 12.06.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Богучарский район**



Дата съемки: 08.04.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Богучарский район**



Дата съемки: 03.05.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

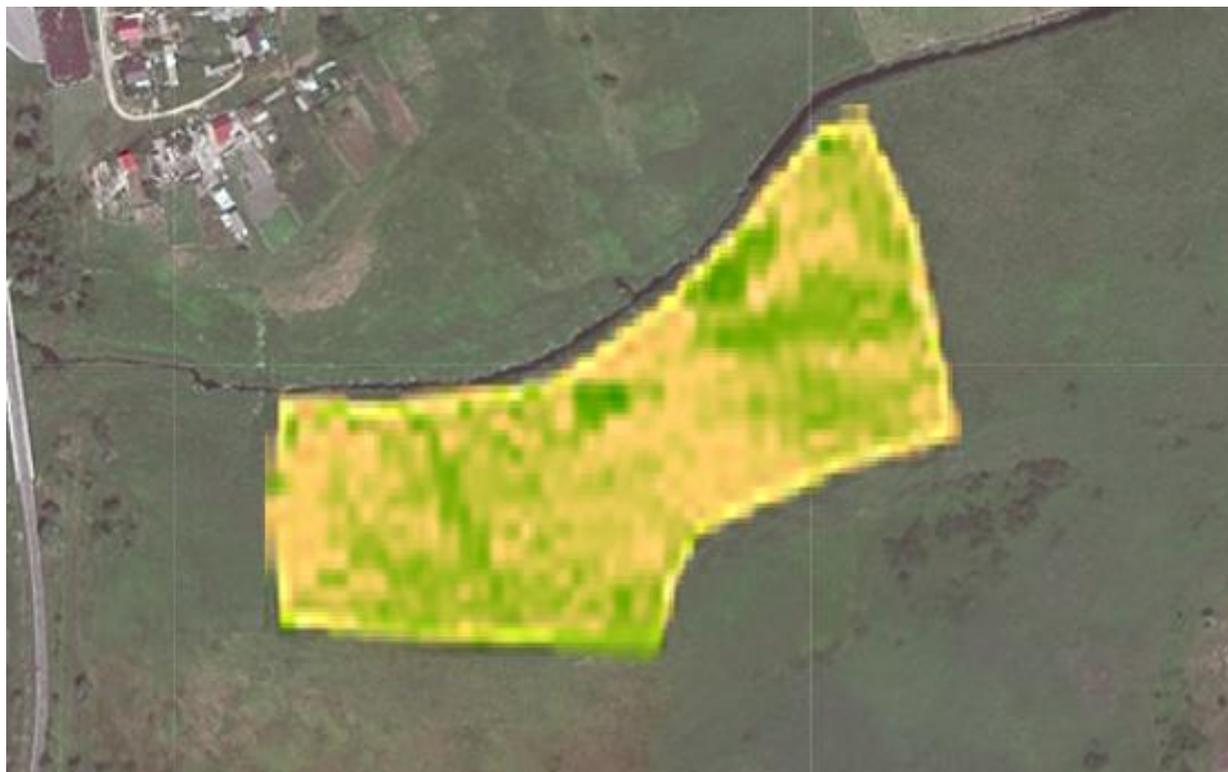
**Богучарский район**



Дата съемки: 19.06.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

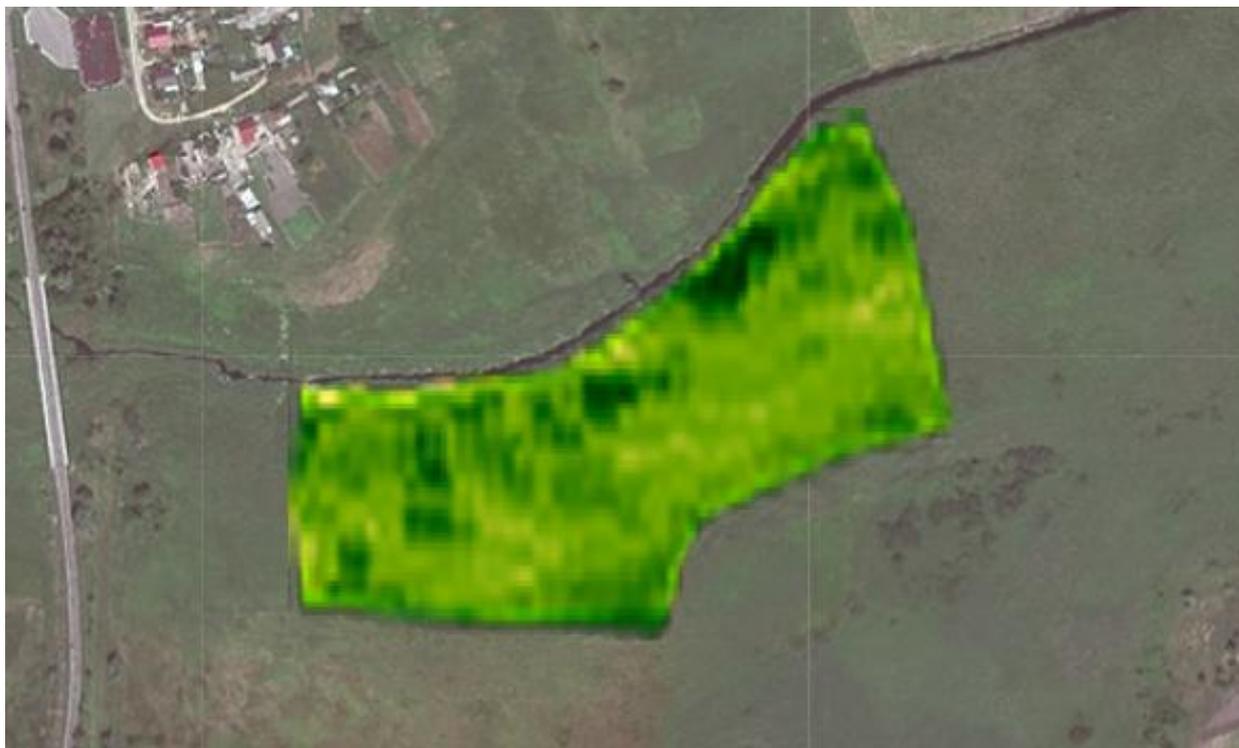
**Богучарский район**



Дата съемки: 05.04.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Богучарский район**



Дата съемки: 05.05.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Богучарский район**



Дата съемки: 22.06.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 30.04.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 05.05.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 25.05.2021

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 08.04.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 15.04.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 09.06.2022

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 08.04.2023

Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**



Дата съемки: 28.04.2023

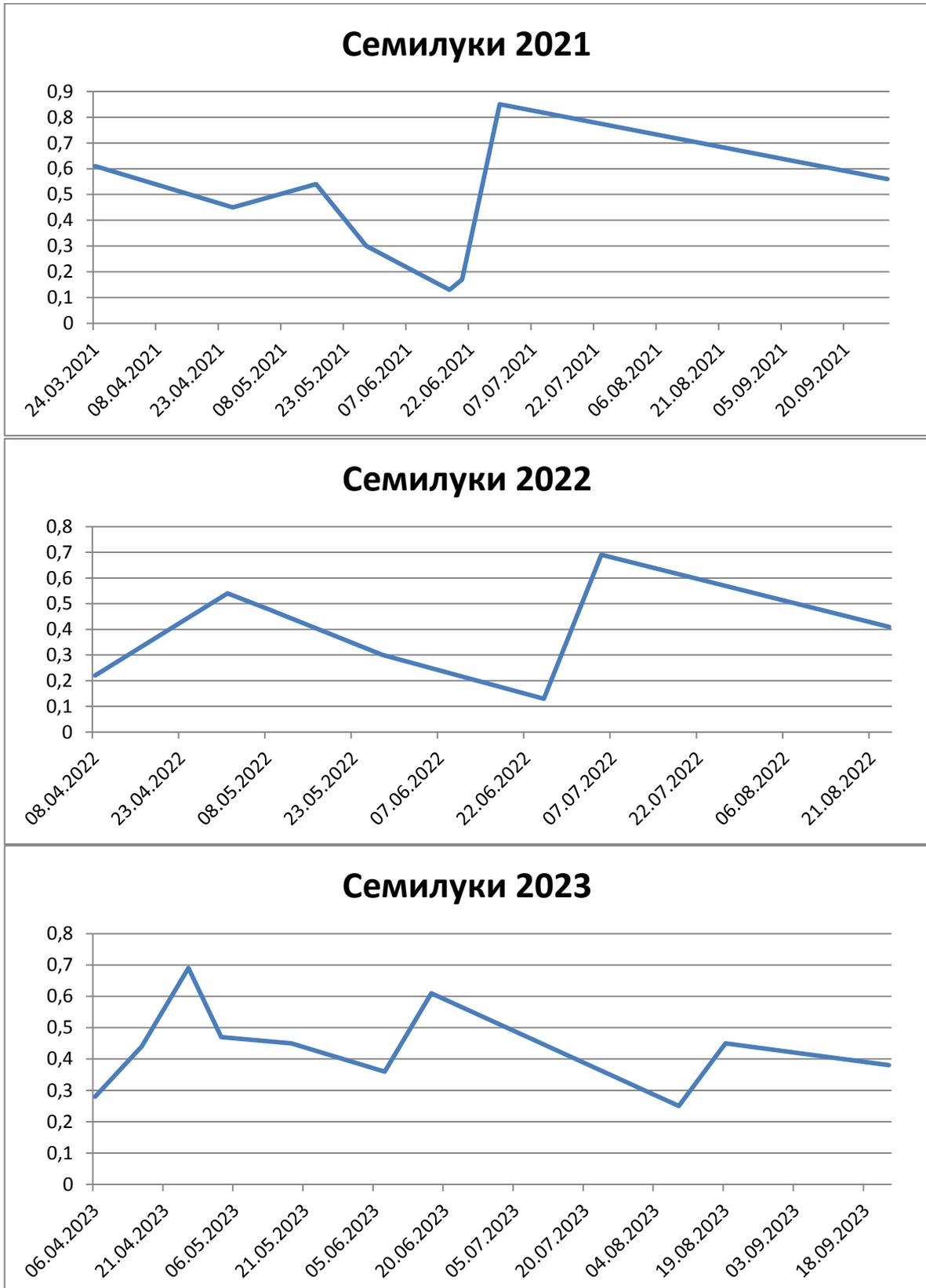
Карты распределения индекса NDVI для исследуемых участков луговых  
фитоценозов

**Таловский район**

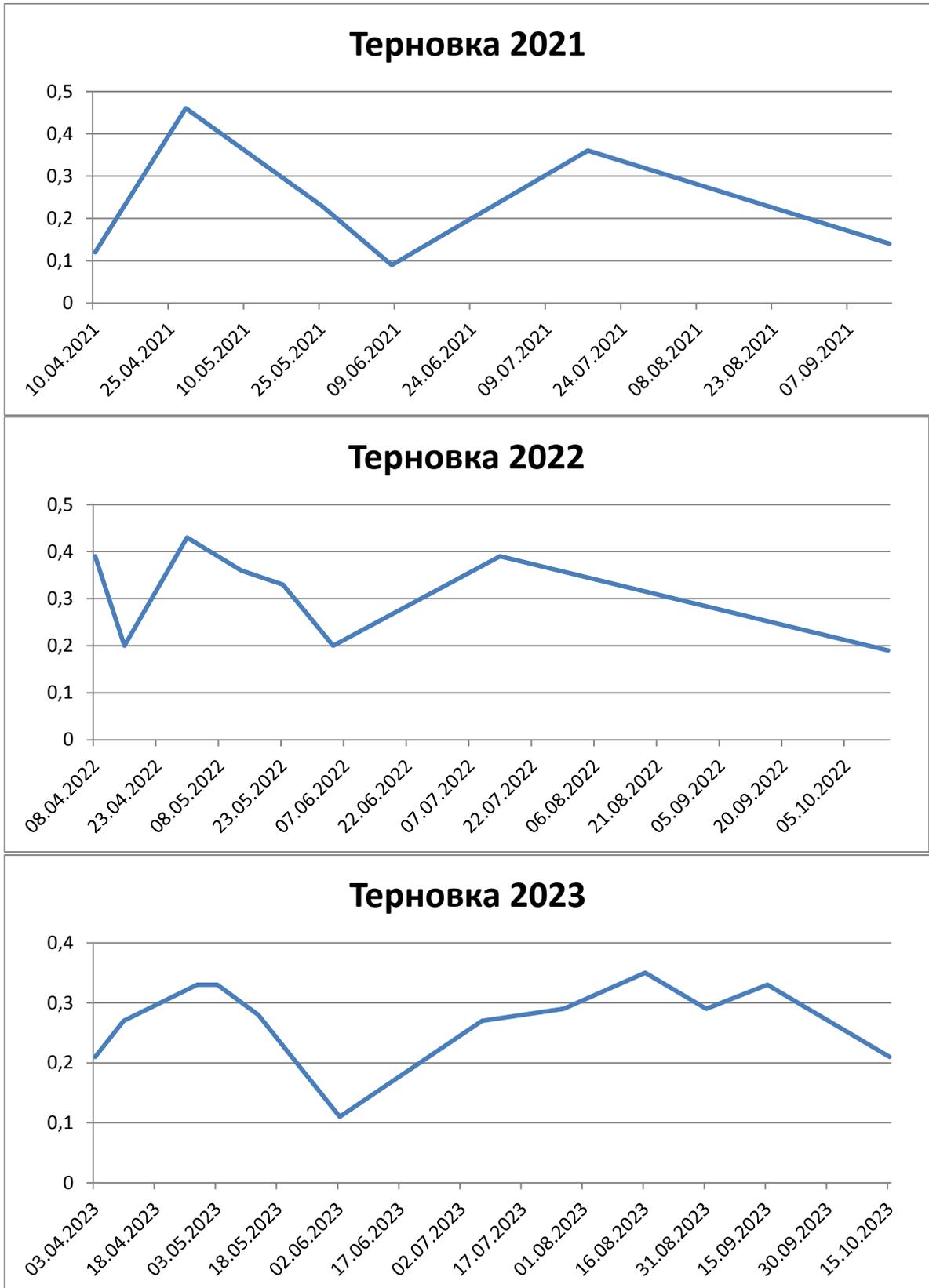


Дата съемки: 02.06.2023

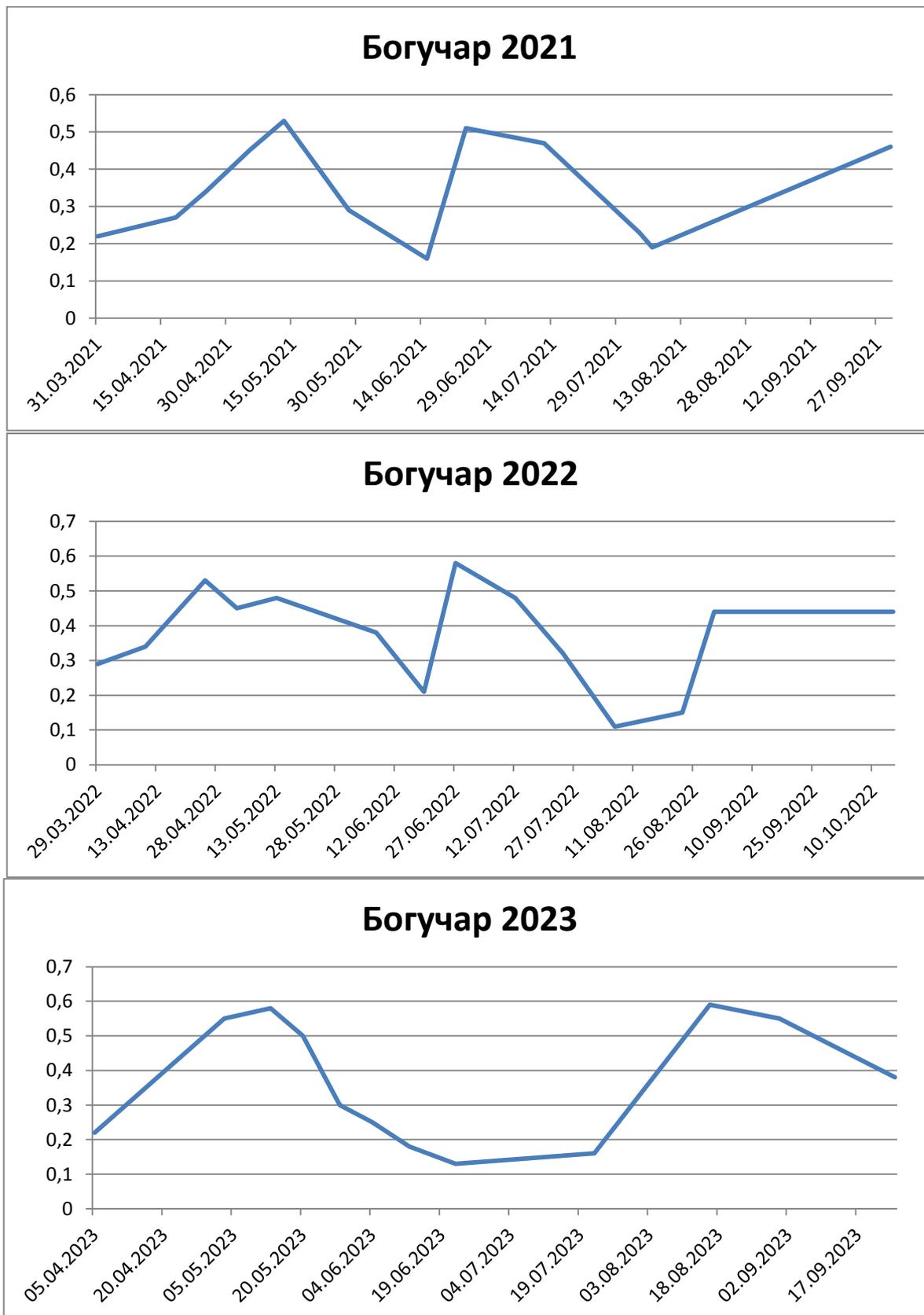
Сезонная динамика амплитуды значений индекса NDVI для исследуемых участков луговых фитоценозов



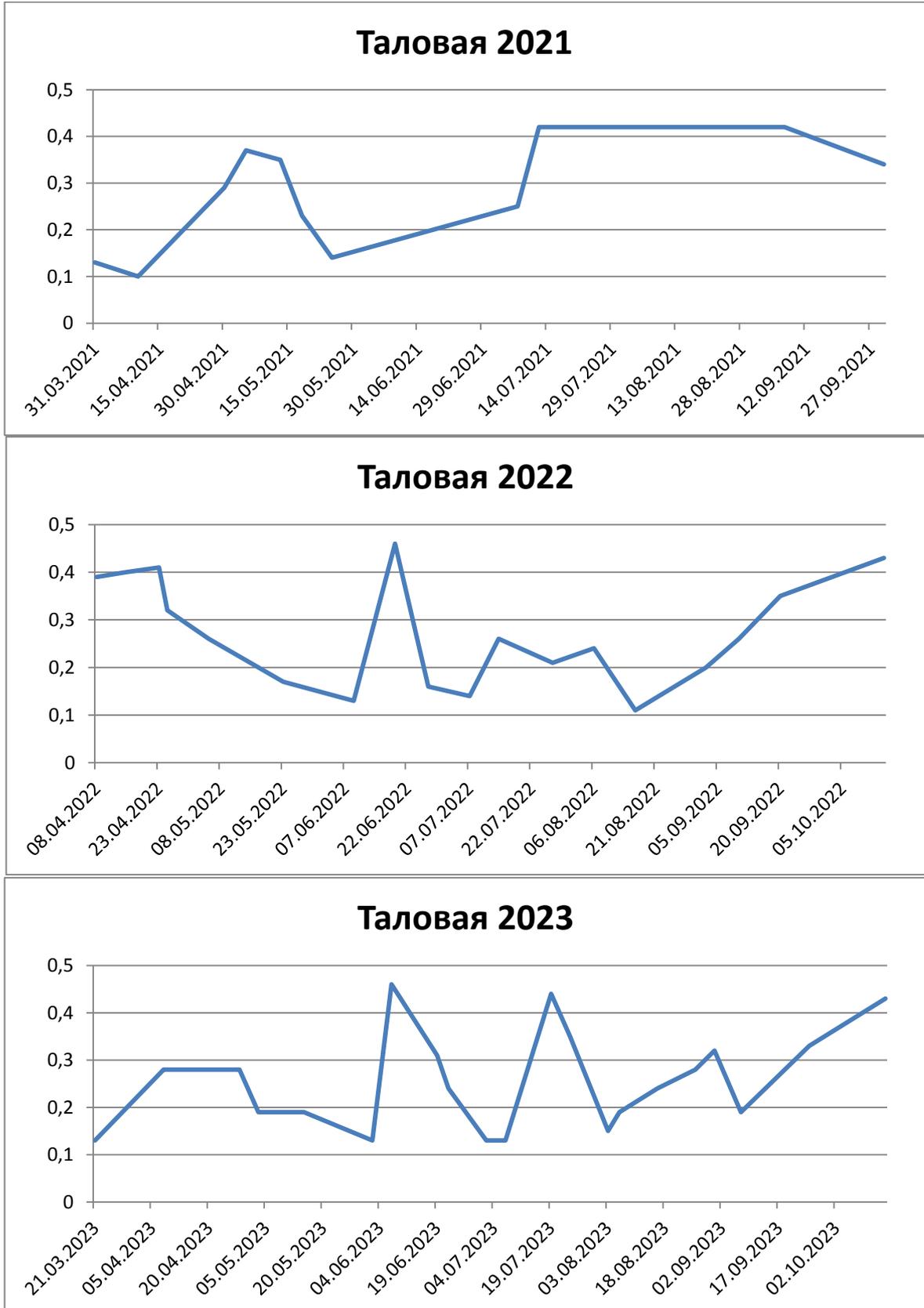
Сезонная динамика амплитуды значений индекса NDVI для исследуемых участков луговых фитоценозов



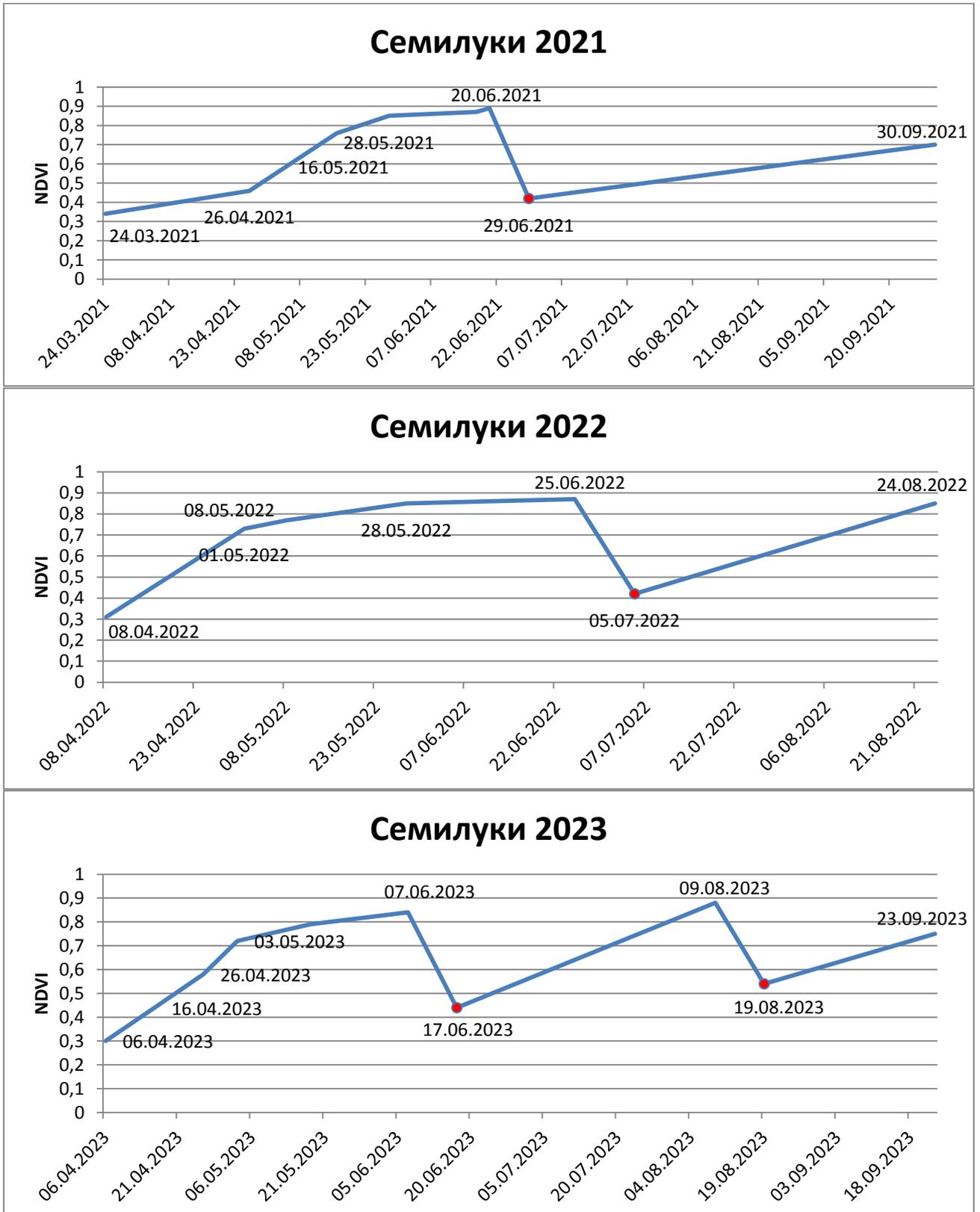
Сезонная динамика амплитуды значений индекса NDVI для исследуемых участков луговых фитоценозов



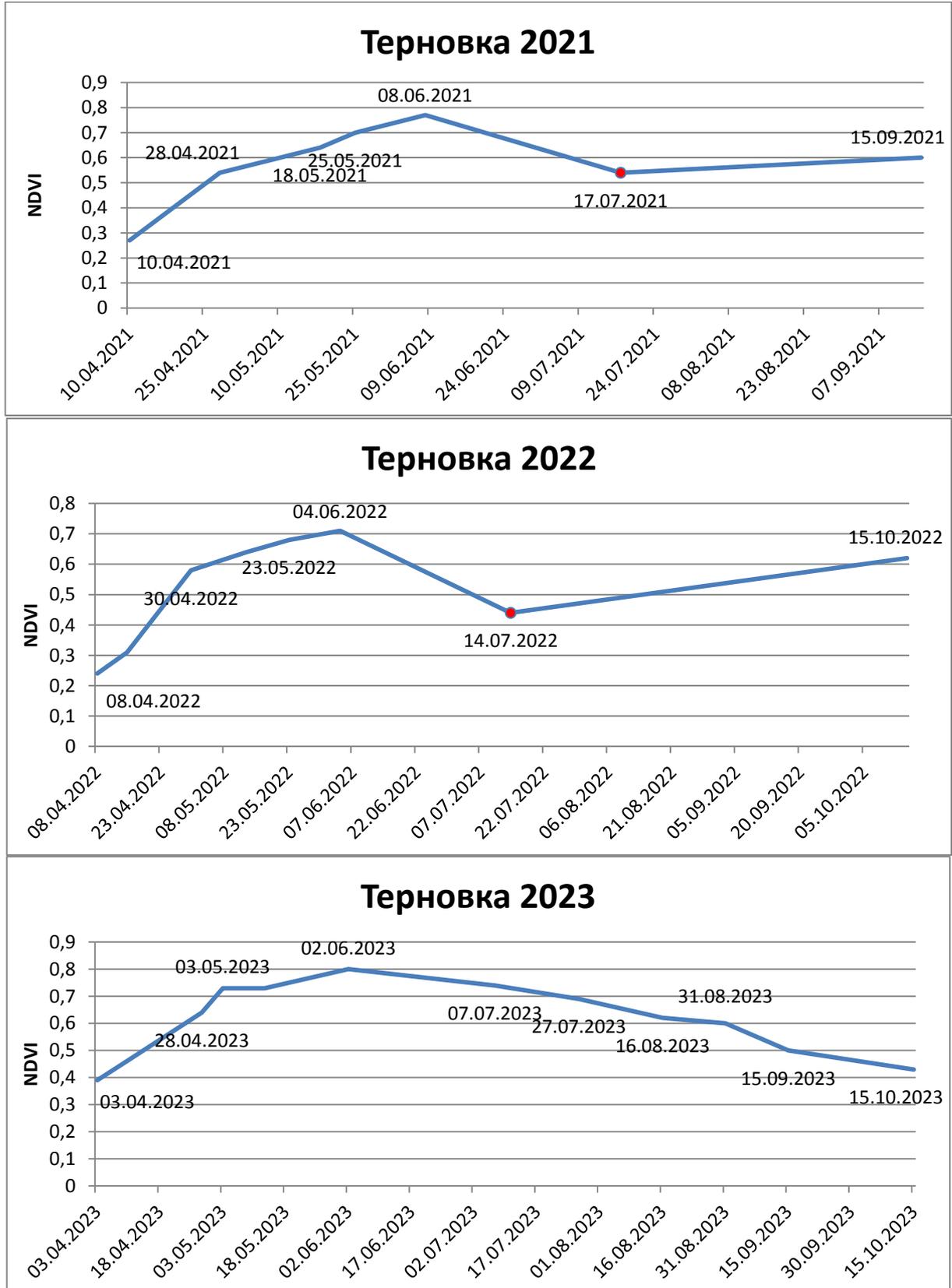
Сезонная динамика амплитуды значений индекса NDVI для исследуемых участков луговых фитоценозов



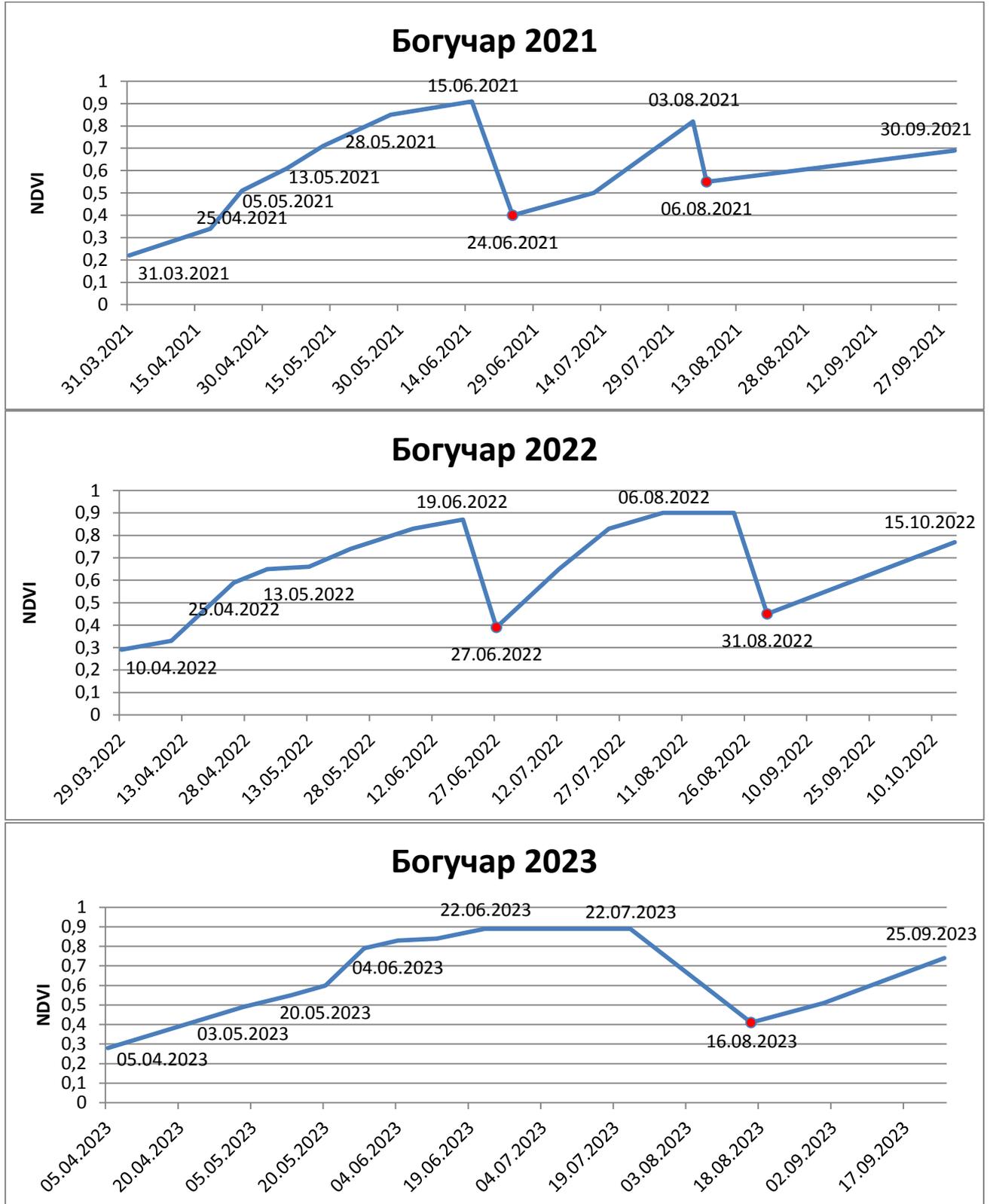
Сезонная динамика средних значений индекса NDVI для исследуемых  
участков луговых фитоценозов



Сезонная динамика средних значений индекса NDVI для исследуемых участков луговых фитоценозов



Сезонная динамика средних значений индекса NDVI для исследуемых  
участков луговых фитоценозов



Сезонная динамика средних значений индекса NDVI для исследуемых участков луговых фитоценозов

