

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ СЕНОКОСНЫХ ПОЛЕЙ ПО ГЕОБОТАНИЧЕСКИМ, НАЗЕМНЫМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2023 г. И. Ю. Ботвич^а, *, Н. А. Кононова^а, Д. В. Емельянов^а, Т. И. Письман^а

^аИнститут биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

*E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

Поступила в редакцию 28.04.2022 г.

Проведена оценка возможности мониторинга сенокосных угодий на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CI_{Green}, NDRE, NDMI), рассчитанных по спутниковым данным Sentinel-2 в течение вегетационного сезона 2018 г. Геоботанические исследования и данные наземной спектрофотометрии проводились одновременно в одно и то же время суток и использовались как дополнительный этап мониторинга сенокосения. Показана возможность распознавания сенокосных угодий и определения даты сенокосения по наземным и спутниковым спектрометрическим данным. Отмечено падение величины индексов (NDVI, CI_{Green}, NDRE, NDMI) в дату сенокосения (25.07.2018 г.). Подтверждена достоверность возможности дешифрирования сенокосных полей по индексу NDVI. Показано, что даты сенокосения, определенные по спутниковым данным, хорошо согласуются с наземными датами сенокосения (25 июля и 27 августа). Построены карты пространственного распределения индекса NDVI сенокосных полей по спутниковым данным Sentinel-2 за даты (18 июня, 10 июля и 27 августа). Полученные карты позволяют выявлять сенокосные поля и дату сенокосения на больших территориях.

Ключевые слова: сенокосные угодья, спутниковые данные, Sentinel-2, Spectral Evolution, NDVI, CI_{Green}, NDRE, NDMI

DOI: 10.31857/S0205961423010037, **EDN:** MLOLYA

ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах развития сельского хозяйства Российской Федерации одной из проблем было соответствие кормовой базы потребностям животноводства. В условиях рыночной экономики роль кормовой базы в производстве конкурентоспособной продукции животноводства в определенной степени возрастает. Это обусловлено изменениями форм и методов хозяйствования в аграрной системе.

Для интенсификации животноводства требуется создание устойчивой кормовой базы. Луговые и степные фитоценозы являются стабилизирующим средством сохранения окружающей среды (Родионова, 2017). Поддержание высокой урожайности фитоценозов на сенокосах является одной из основных задач сельского хозяйства.

Большое влияние на изменение растительных сообществ оказывает регулярное сенокосение, вызывающее изменение видового состава травостоя и его продуктивности. Характер этого воздействия зависит от сроков и частоты скашивания, высоты среза, способов ухода за сенокосом и может различно проявляться на различных типах степей и лугов (Лапенко и др., 2018).

Являясь источником биологически ценных кормов из дикорастущих трав, природные кормовые угодья (сенокосы) играют важнейшую роль в отечественном животноводстве. Повышенная антропогенная нагрузка и меняющиеся климатические условия часто приводят к трансформации природных травостоев, в том числе к изменению их продуктивности и видового состава. Организация устойчивого животноводства сопряжена с необходимостью постоянного контроля состояния естественных кормовых угодий. Для оценки состояния природных травостоев обычно проводят наземные геоботанические обследования, которые в силу своей трудоёмкости и больших размеров, требующих обследования территорий, не способны обеспечить регулярное получение информации с достаточно высоким уровнем точности (Ерошенко и др., 2018).

В настоящее время проведено недостаточно исследований по мониторингу сенокосения на основе дистанционного зондирования. Имеются данные по расчету вегетационного индекса NDVI полей хозяйства Курагинское (Россия) за 2020 г. Индекс NDVI получен на основе спутниковых снимков PlanetScore с пространственным разрешением 3 м. Получены карты пространственного

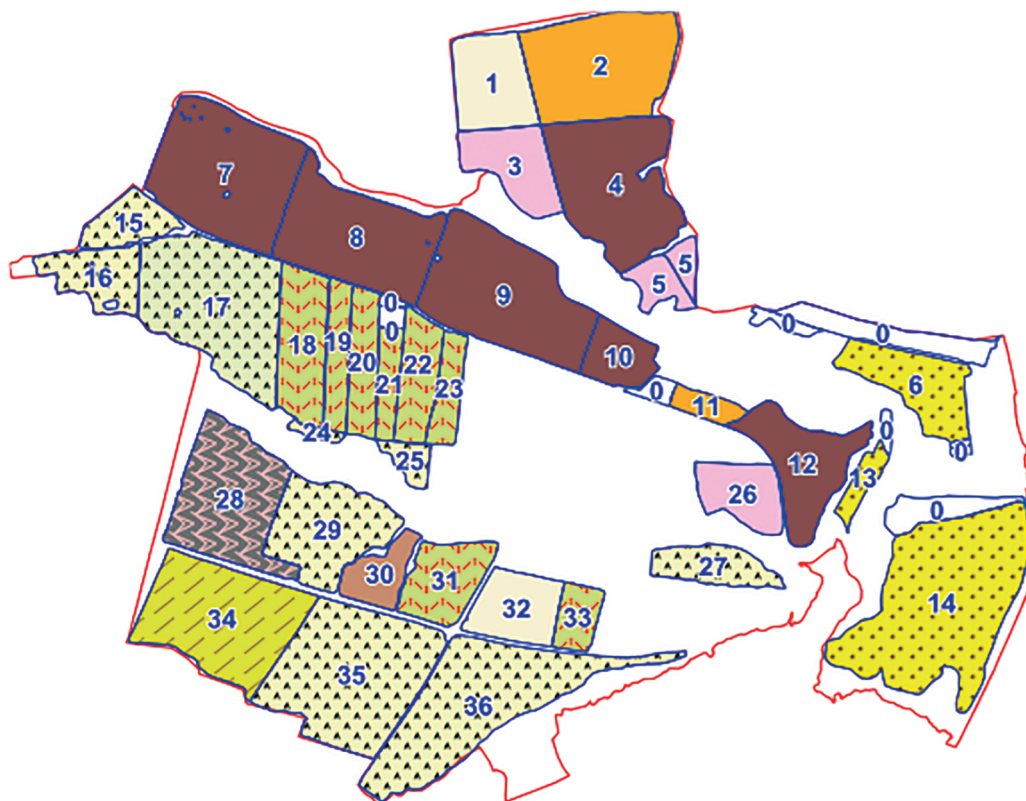


Рис. 1. Тематическая карта полей на территории Красноярского НИИСХ (Минино) в 2018 г. Поля № 34 и 35 — сенокосные угодья.

разрешения NDVI полей, анализ которых позволяет отличить поля до кошения и после кошения (Erunova, 2021).

В следующей работе представлены данные по исследованию стресса дефицита воды у растений, подверженных дефициту почвенной влаги (Bayat et al., 2016). Растения могут ощущать дефицит влаги после кошения. Показано, что наиболее чувствительными к дефициту воды параметрами являются листовой индекс (LAI) и индекс содержания воды в листьях (C_w).

В работе Bretas et al. показана корреляция индексов NDVI, EVI и OSAVI с биомассой пастбищ в Бразилии. Для расчета индексов использованы снимки Landsat 8 и Sentinel-2 (Bretas et al., 2020).

Целью данной работы является мониторинг сенокосных угодий на основе различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CI-Green, NDRE, NDMI), рассчитанных по наземным спектрометрическим и спутниковым данным Sentinel-2 в течение вегетационного сезона 2018 г.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования. Объектом исследования являются поля на территории землепользования Красноярского научно-исследовательского института сельского хозяйства (НИИСХ ФИЦ КНЦ СО РАН) вблизи п. Минино (Средняя Сибирь, Красноярский край) в течение вегетационного периода 2018 г. Поля расположены в южной части Красноярской лесостепи, в 5–7 км от г. Красноярска (рис. 1). Территория землепользования — равнинная, южная, открытая, достаточно теплая часть лесостепи с выраженными остепненными участками. Поля № 34 и 35 являются сенокосными угодьями с 2016 г. и имеют площади 108 и 132 га соответственно.

Для верификации спутниковых данных исследуемые поля № 34 и 35 разделены на экспериментальные участки 1–9 (без сенокосения и с разной датой сенокосения в течение вегетационного сезона 2018 г.) (рис. 2).

Красноярская лесостепь имеет прохладный режим погоды, достаточное увлажнение (гидротермический коэффициент равен 1.2–1.6). Характеризуется суммой температур за период с температурами выше $+10^{\circ}\text{C}$ от 1400 до 1600 $^{\circ}\text{C}$, количество осадков достигает за этот же период 160–210 мм,



Рис. 2. Карта исследуемых полей № 34 и 35, разделенных на экспериментальные участки: участки 1–3 (без сенокосения), участки 4–9 (с сенокосением в разные даты). Участки 4 и 5 скошены 25.07, участки 6 и 7 – 19.08, участки 8 и 9 – 27.08.

среднегодовое количество осадков составляет 488 мм. Период вегетации растений при температуре выше 10°C длится 100–105 дней (Кононова, 2019).

Геоботанические методы исследований. С целью достоверного определения изменения спектральных характеристик растительности до и после сенокосения на тестовом поле № 34 проведены модельные опыты. В пяти точках на площадках размером 50 × 50 см в трехкратной повторности определяли проективное покрытие и снимали спектры общего вида растительности (до среза). Затем проводился срез надземных побегов, после чего спектры снимали повторно. Параллельно определяли видовой состав. Для верификации данных дистанционного зондирования в пределах каждой пробной площадки определена сырая надземная фитомасса (Кононова, 2019).

Наземные спектрофотометрические методы. Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) проводились одновременно с геоботаническими исследованиями в течение вегетационного периода 2018 г. Для проведения наземной спектрометрии использовали полевой спектрометрический комплекс, состоящий из полевого портативного спектрорадиометра Spectral Evolution PSR-1100F, портативного компьютера PDA GETAC, калибровочного отражающего эталона (Spectral Evolution), цифрового фотоаппарата и соответствующего программного обеспечения (Ботвич и др., 2018; Pisman et al., 2019).

С помощью данного комплекса производились измерения коэффициента спектральной яркости объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Полученные спектры имеют привязку к координатам местности по GPS, высоте местности, обеспечены соответствующей фотосъемкой и голосовыми заметками. Измерения КСЯ растительности исследуемых полей выполнялись с 11 до 15 ч местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало достаточные условия освещения объектов.

Спутниковые данные. В работе использованы спутниковые данные Sentinel-2 за 2018 г. с пространственным разрешением 10 м. Для этого используются данные Sentinel-2, имеющие уровень обработки Level-2A. Атмосферная коррекция данных выполнена на основе алгоритма, предложенного в статье авторов (Richter and Schläpfer, 2011).

Для оценки возможности распознавания сенокосных полей и даты сенокосения использованы различные спектральные вегетационные индексы – NDVI, CIGreen, NDRE, NDMI (табл. 1).

NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы (Rouse et al., 1974). Этот индекс использует контраст характеристик

Таблица 1. Формулы спектральных индексов по наземным спектрометрическим (Spectral Evolution PSR-1100F) и спутниковым (Sentinel-2) данным

Вегетационный индекс	Формула расчета
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$
CIGreen (Green Chlorophyll Index)	$CIGreen = NIR / GREEN - 1$
NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)	$NDRE = (NIR - RED\ Edge) / (NIR + RED\ Edge)$
NDMI (Normalized Difference Moisture Index)	$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$

Примечание: NIR — отражение в ближней инфракрасной области, RED — отражение в красной области спектра, GREEN — отражение в зеленой области спектра, RED Edge — отражение в крайней красной области, SWIR — отражение в средней инфракрасной области спектра.

двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных — поглощения пигментом хлорофилла в красном канале (RED) и высокой отражательной способности растительности в инфракрасном канале (NIR). На значения индекса влияет видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция склонов и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. В случае, если густота растительного покрова более 70%, индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона. Если густота растительного покрова меньше 30% и более 80% NDVI применять не стоит.

CIGreen — относительный индекс хлорофилла (Green Chlorophyll Index) — показатель фотосинтетической активности растительного покрова, наиболее часто используемый при оценке содержания хлорофилла а и b в листьях растений по мультиспектральным данным ДЗЗ, у которых отсутствует крайний красный канал (Gitelson et al., 2005). Чем больше содержание хлорофилла в листьях растений, тем выше значения индекса.

NDRE — нормализованный разностный индекс азота (Normalized Difference Red Edge Index) — показатель фотосинтетической активности растительного покрова, используемый для оценки концентраций азота в листьях растений с использованием ближнего инфракрасного (750–1000 нм) и крайнего красного (690–730 нм) каналов. Индекс применим при оценке угнетенной и стареющей растительности. Эффективен при оценке содержания азота в листьях растений по мультиспектральным данным, у которых есть крайний красный и ближний инфракрасный спектральные каналы (Barnes et al., 2000). Для растительности индекс NDRE принимает положительные значения, чем выше содержание азота в листьях растений, тем больше значение индекса.

NDMI — нормализованный разностный индекс влажности (Normalized Difference Moisture Index) — показатель содержания влаги в почве и листьях растений. Для расчета индекса используются значения спектральной яркости в ближнем инфракрасном и среднем инфракрасном диапазонах спектра. Данный индекс более чувствителен к

содержанию влаги в почве и листьях растений по сравнению с индексом NDWI за счет использования среднего инфракрасного канала. Индекс NDMI предназначен для оценки неоднородности степени увлажнения растительности и почв (Gao B.C., 1995).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геоботаническое исследование. Исследуемые поля представляют собой сенокосные угодья и залежи, возраст которых не превышает 3 года. Поле № 34 в основном является сенокосным угодьем с 2016 г. и поле № 35 — молодой залежью, отданной под сенокос (рис. 1). Горизонтальная структура травостоя на поле № 34 мозаичная. Общее проективное покрытие варьирует в пределах 65–85% в зависимости от видового состава. Мозаичность структуры травостоя способствовала значительным колебаниям фитомассы в разных срезах (табл. 2) (Кононова, 2019).

Злаковую основу составляет мезофит пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) Nevski со средней высотой 75 см и проективным покрытием до 50%. *Disymbrium loeselii* L. Из типично сорных видов также встречаются липучка ежевидная *Lappula echinata* Gilib. и льнянка обыкновенная *Linaria vulgaris* Mill. На участке отмечены монодоминантные полосы донника лекарственного *Melilotus officinalis* (L.) Pall., горошка приятного *Vicia cracca* L. с проективным покрытием до 60%, что существенно увеличивает кормовую ценность травостоя (Кононова, 2019).

Наземная спектрофотометрия. Геоботанические исследования и данные наземной спектрофотометрии проводились одновременно в одно и то же время суток (в период с 10 до 15 ч местного времени) и использовались как отдельный этап мониторинга сенокосения.

Известно, что растительный покров отличается характерным максимумом отражательной способности в зеленой (0.55 мкм), минимумом — в красной (0.66 мкм) и резким увеличением отражения в ближней инфракрасной зоне. Низкая отражательная способность вегетирующих расте-

Таблица 2. Виды доминирующих растений и величина сырой надземной фитомассы на опытных площадках размером 50 × 50 см на поле № 34

№ среза	Виды доминирующих растений	Общая сырая надземная фитомасса, г/м ²
1	Одуванчик лекарственный <i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg	569.7 ± 23.5
2	Липучка ежевидная <i>Lappula echinata</i> Gilib Гулявник Лезеля <i>Sisymbrium loeselii</i> L.	501.0 ± 26.8
3	Донник лекарственный <i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.	694.0 ± 23.3
4	Пырей ползучий <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	896.5 ± 38.5
5	Бодяк полевой <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop., выюнок полевой и донник лекарственный <i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall	772.6 ± 25.3

ний в красной зоне связана с поглощением, а ее увеличение в зеленой зоне — с отражением этих лучей хлорофиллом. Большие коэффициенты яркости в ближней инфракрасной зоне объясняются пропусканием этих лучей хлорофиллом и отражением их от внутренних тканей листа (Кострова, Костров, 2010).

На рис. 3. представлены наземные спектры сенокосных полей до сенокоса и после. Наземные спектры отражения травостоя до и после сенокоса существенно отличаются по величине КСЯ и по форме спектра. Зависимость КСЯ от длины волны сенокосных полей до сенокоса имеет вид классической кривой активной фотосинтезирующей растительности. Значения отражения в красном диапазоне спектра (0.66 мкм) определяют концентрацией хлорофилла, содержащегося в листьях растений. В красной зоне спектра величина КСЯ минимальна, т.е. отражение минимально (имеется наибольший прогиб). После сенокоса кривая зависимости КСЯ от длины волны выпрямляется, значение КСЯ, т.е. отражение в красной зоне спектра возрастает.

Спутниковый мониторинг. Для оценки возможности распознавания сенокосных угодий и определения даты сенокоса по спутниковым данным проведен анализ информативности различных вегетационных индексов (NDVI, ClGreen, NDRE, NDMI) в течение вегетационного периода 2018 г. (рис. 4).

Данные индексы являются показателями фотосинтетической активности растительного покрова: NDVI используется для качественной оценки величины фитомассы растений, ClGreen — для оценки содержания хлорофилла а и b в листьях растений, NDRE — для оценки концентрации азота в листьях растений. В результате выявлена идентичная динамика спектральных индексов NDVI, ClGreen и NDRE полей до сенокоса и после сенокоса (рис. 4, а, 4, б, 4, в). Отмечено падение величины индексов в дату сенокоса (25.07.2018). Связано это с тем, что в связи с сенокосом происходит уменьшение величины

фотосинтезирующей биомассы и соответственно — хлорофилла и азота.

Индекс NDMI является показателем содержания влаги в почве и листьях растений (рис. 4, г). В связи с этим динамика индекса NDMI аналогична динамике индексов NDVI, ClGreen и NDRE полей с сенокосом. Однако на поле без сенокоса в конце вегетационного периода динамика NDMI отличается от динамики остальных исследуемых индексов. В конце сезона растительность теряет влагу, иссушается, обнажается почва. В результате величина индекса NDMI уменьшается. Таким образом, выявлено, что индекс NDMI является более чувствительным к иссушению растительности и почвы, чем индексы NDVI, ClGreen и NDRE.

На рис. 4. представлена динамика четырех вегетационных индексов: NDVI (а), ClGreen (б), NDRE (в) и NDMI (г) полей без сенокоса и с сенокосом по спутниковым данным Sentinel-2 (дата сенокоса — 25.07). При анализе спутниковых данных, представленных в нашей работе, выяснено, что динамика индексов NDVI, ClGreen, NDRE в течение вегетационного сезона подобна, так как они являются показателями фотосинтетической активности растительного покрова. Однако, отмечено, что в результате сенокоса произошло уменьшение величин индексов до значений, которые различаются для каждого индекса: для NDVI — 0.24, для ClGreen — 1, для NDRE — 0.15.

Подтверждением достоверности возможности дешифрирования сенокосных полей по индексу NDVI является сравнительная оценка выявления различных дат сенокоса в течение вегетационного периода по наземным и спутниковым данным (рис. 5). На рис. 5 представлена динамика NDVI для 3-х участков. Именно эти 3 участка выбраны потому, что на них сенокос было проведено в разные даты. В результате показано, что даты сенокоса, определенные по спутниковым данным, хорошо согласуются с наземными датами сенокоса (25.07 и 27.08). Наземные

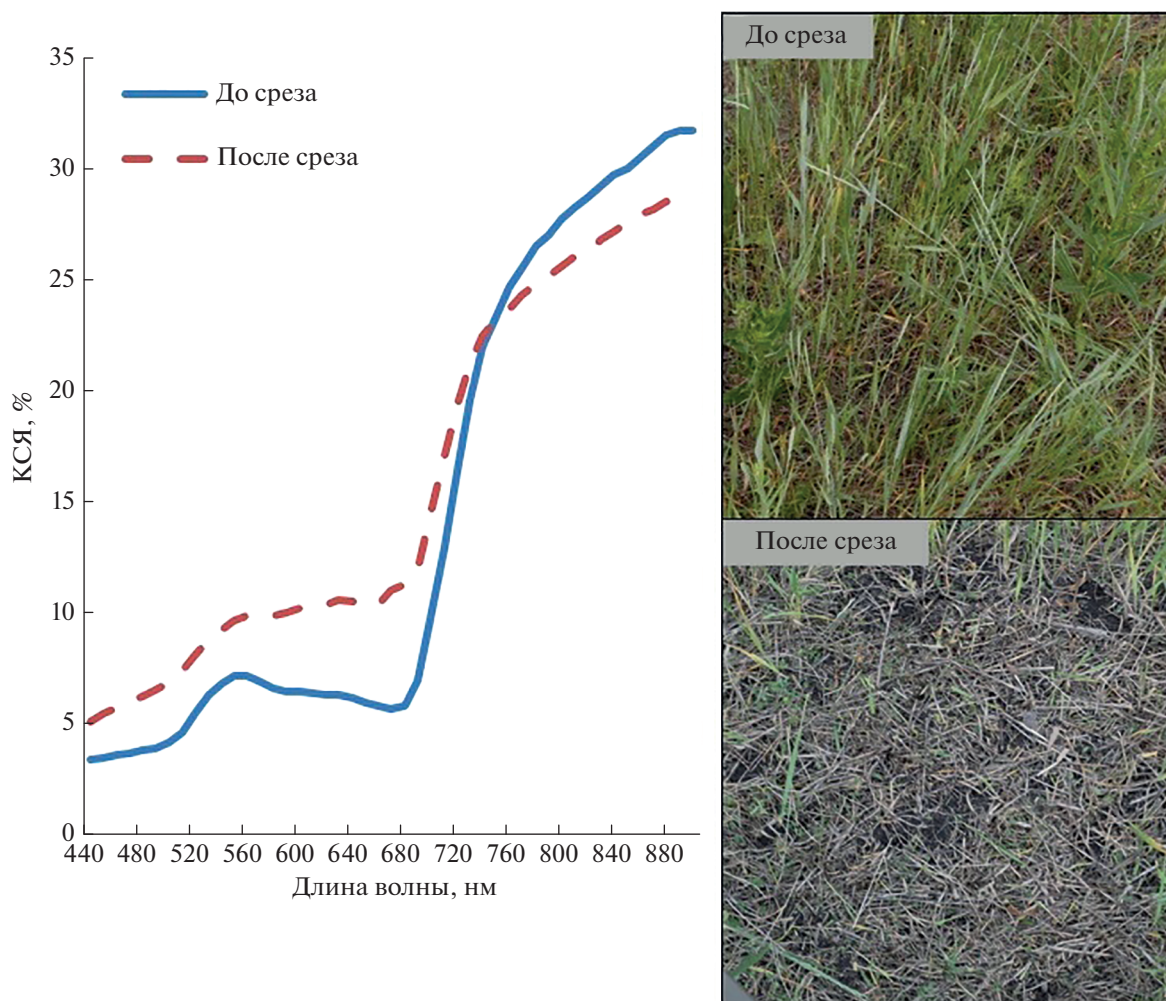


Рис. 3. Наземные спектры сенокосных полей до сенокосения и после.

данные использованы для верификации спутниковых данных — подтверждения достоверности использования резкого падения индекса NDVI при сенокосении в разные даты.

Наиболее информативным приемом, позволяющим отобразить и изучить пространственную структуру земельных угодий, служит картографирование. Интенсивно развивающиеся методы цифрового картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли являются наиболее перспективными в решении данной проблемы.

Построение карт пространственного распределения вегетационных индексов на основе спутниковых данных высокого пространственного разрешения в течение периода вегетации является неотъемлемой частью мониторинга растительности, в том числе сенокосных угодий.

На рис. 6 представлены карты пространственного распределения индекса NDVI исследуемых полей № 34 и 35 в течение вегетационного перио-

да (18.06, 10.07 и 27.08). В середине июня (18.06) растительность находится в активной фазе, в это время значения NDVI полей № 34 и 35 близки и достигают достаточно высоких величин — около 0.6–0.7 (рис. 6, а).

В начале июля (10.07) до сенокосения на отдельных площадках поля № 34 (выделено желто-красным цветом) показатели NDVI достигают более высоких значений (0.7–0.8) (рис. 6, б).

Доминирующий на обоих полях злак пырей ползучий формирует достаточно плотный травостой. Среднее проективное покрытие доминанта составляет 50%, в то же время на отдельных площадках поля № 34 покрытие пырея достигает 80%, что и обуславливает высокие показатели NDVI. Одновременно на поле № 35 (трехлетняя залежь) некоторые виды растений зацветают, в связи с чем величина NDVI начинает уменьшаться (выделено синим цветом).

В конце августа (27.08) на поле № 34, на участке 5 (выделено зеленым цветом) величина индекса

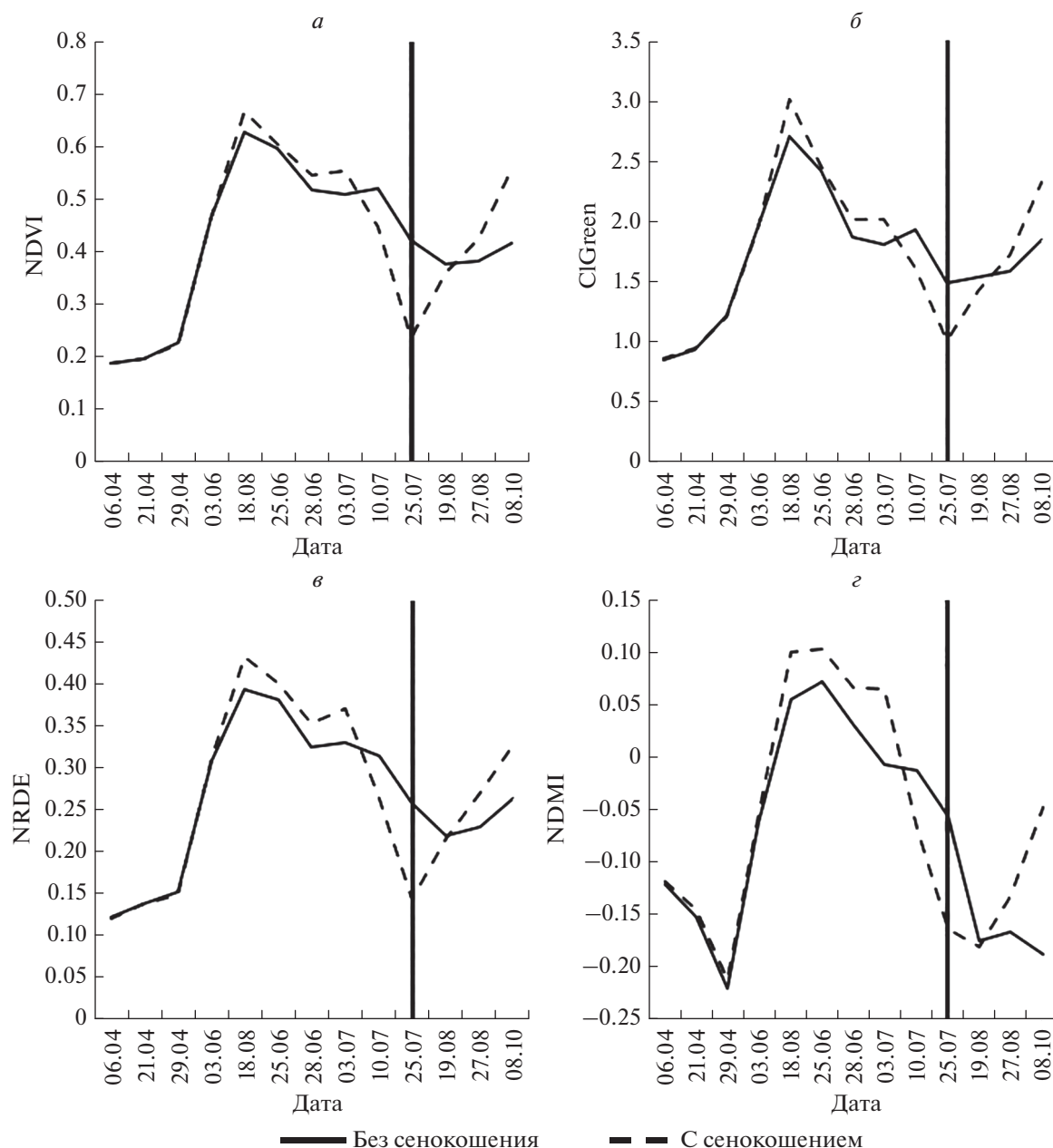


Рис. 4. Динамика вегетационных индексов: NDVI (а), ClGreen (б), NDRE (в) и NDMI (г) полей без сенокосения и с сенокосением по спутниковым данным Sentinel-2 (дата сенокосения – 25.07).

NDVI повышена за счет того, что трава была скошена в конце июля (25.07) и через месяц она снова выросла (рис. 6, в). На участке (6–9) сенокосение проводилось в августе (19.08 и 27.08), в результате чего величина индекса NDVI уменьшилась (обозначено синим цветом).

На поле № 35 в конце августа (27.08) величина NDVI падает за счет пожелтения растительности залежи, так как на этом поле сенокосения не было.

Таким образом, на основе рассматриваемых в данной работе вегетационных индексов (NDVI,

ClGreen и NDRE), которые являются показателями фотосинтетической активности и NDMI, который является показателем содержания влаги в почве и листьях растений, построен алгоритм классификации сенокосных угодий и определения дат сенокосения. Алгоритм приведен для наиболее часто используемого индекса NDVI.

Для участков 1–9 строятся графики динамики NDVI в течение вегетационного сезона. Для определения дат сенокосения использовали классификацию типа дерево решений, основанную на ис-

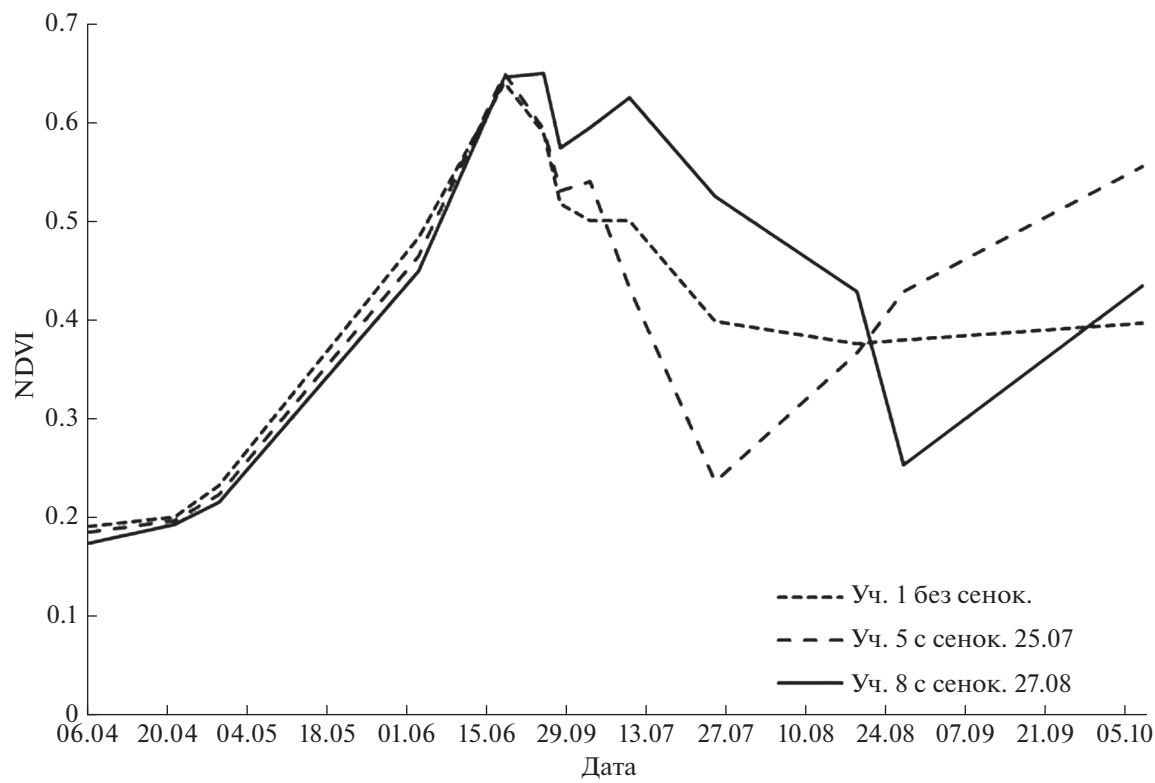


Рис.5. Динамика NDVI экспериментальных участков (без сенокошения и с сенокошением в разные даты) в течение вегетационного периода по спутниковым данным Sentinel-2.

пользовании пороговых величин. Поиск дат сенокошения выполняется для значений NDVI в июле–августе, так как в более ранний период сенокошение на данной территории не проводится. Далее в алгоритме используются две пороговые величины: 1 – значение NDVI должно быть выше значений, полученных в конце апреля–начале мая. В этот период времени снежный покров отсутствует, рост растительного покрова не происходит. На участках присутствует стерня и остатки расти-

тельности с предыдущего периода вегетации. 2 – значение NDVI должно быть ниже пороговой величины 0.33. Величина данного порога определена на основании значений NDVI тестовых участков 1–3 (без сенокошения).

Сравнение дат сенокошения, определенных по спутниковым данным, с наземными датами покосов показало достоверность определения дат сенокошения по спутниковым данным. Для участков 1–3 отмечено постепенное уменьшение величины NDVI в течение вегетационного сезона, что приводит к выводу об отсутствии сенокошения. Действительно, по наземным данным на этих участках сенокошение не производилось. Для участков 4–9 отмечено резкое уменьшение величины NDVI в разные даты: для участков 4 и 5 – 25.07, для участков 6 и 7 – 19.08 и для участков 8 и 9 – 27.08. Резкое уменьшение величины NDVI свидетельствует об уменьшении биомассы, т.е. скашивании травы. Даты сенокошения, определенные по спутниковым данным, подтверждены наземными данными.

Результаты определения дат сенокошения тестовых участков 1–9 представлены в табл. 3.

Таким образом, нам удалось различать даты скашивания травы. Как и ожидалось, облака и смешанные пиксели снижали точность обнаружения скашивания. Необходимо отметить отли-

Таблица 3. Даты сенокошения исследуемых участков (1–9) по величине NDVI в течение вегетационного периода 2018 г. на основе спутниковых данных Sentinel-2

Номер участка	Дата сенокошения
1	—
2	—
3	—
4	25.07
5	25.07
6	19.08
7	19.08
8	27.08
9	27.08

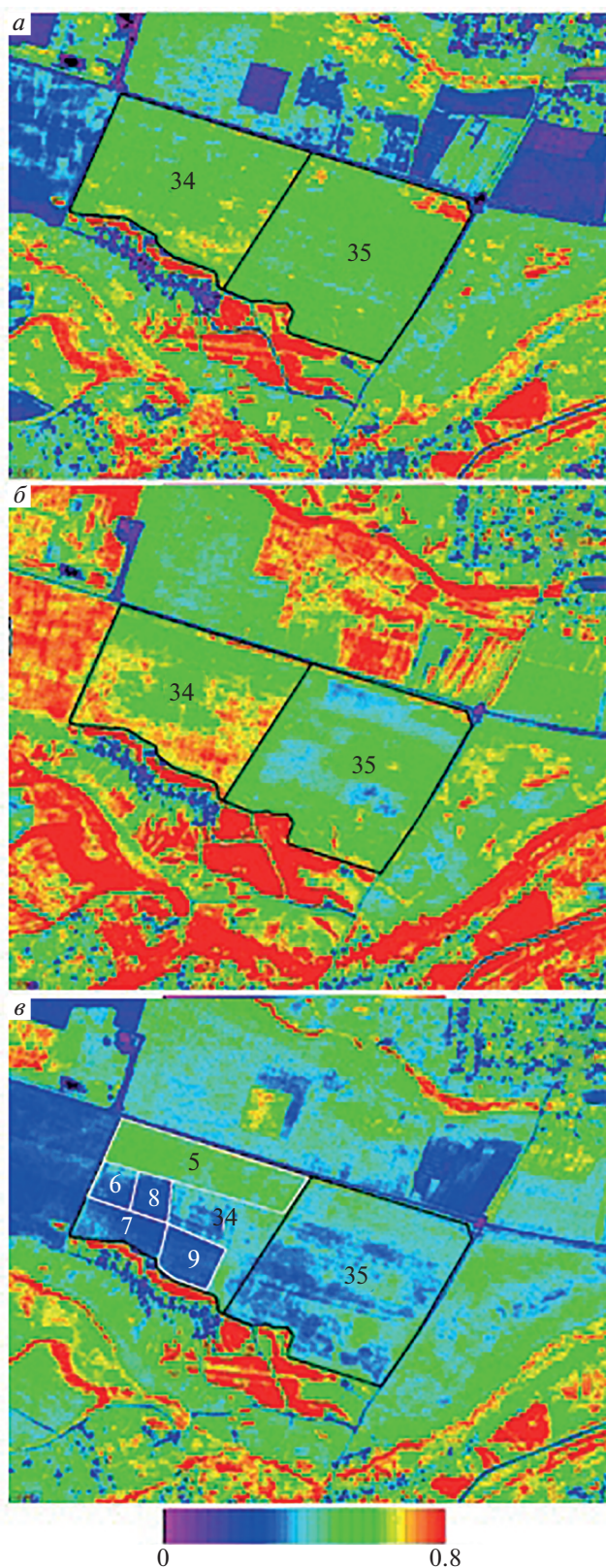


Рис. 6. Карты пространственного распределения индекса NDVI сенокосных полей, построенные за даты: 18.06 (а), 10.07 (б) и 27.08 (в) по спутниковым данным Sentinel-2.

чие определения скашивания и использования поля под пастбище. При скашивании величина NDVI уменьшается резко, при выпасе величина NDVI снижается плавно.

Трудности в обнаружении скашивания связаны с применением на одном участке разных способов использования поля (временная залежь, тени от близко расположенного леса и т.д.). В этом случае есть преимущество для обнаружения сенокосения при использовании больших площадей и построении карт пространственного распределения вегетационных индексов (в данном случае NDVI на площадях 108 и 132 га).

Другие авторы обнаружили, что маскирование облаков имеет большое значение для идентификации кошения травянистых угодий по двум причинам. Во — первых, однодневные облачные наблюдения вызывают внезапное падение NDVI, которое можно спутать с покосом. Во — вторых, затяжная облачность препятствует обнаружению быстрых событий, таких как кошение травы. В благоприятных условиях (температура, влажность) трава может быстро отрастать, и величина NDVI возвращается в течение недели к уровню до кошения. Таким образом, даже еженедельные облачные периоды могут помешать обнаружению кошения (Kolecka, 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате оценки возможности мониторинга сенокосных угодий на основе наземных спектрометрических данных и различных спектральных вегетационных индексов (NDVI, CiGreen, NDRE, NDMI), рассчитанных по спутниковым данным Sentinel-2 в течение вегетационного сезона 2018 г., сделаны следующие выводы:

- показана возможность распознавания сенокосных угодий по наземным спектрометрическим данным. Геоботанические исследования и данные наземной спектрофотометрии проводились одновременно в одно и то же время суток и использовались как отдельный этап мониторинга сенокосения.

- показана возможность распознавания сенокосных угодий и определения даты сенокосения по спутниковым данным. Отмечено падение величины вегетационных индексов (NDVI, CiGreen, NDRE и NDMI) в дату сенокосения (25.07.2018 г.), что подтверждается наземными данными.

- подтверждена достоверность возможности дешифрирования сенокосных полей по индексу NDVI. Показано, что даты сенокосения, определенные по спутниковым данным, хорошо согласуются с наземными датами сенокосения (25 июля и 27 августа).

- на основе рассматриваемых в данной работе вегетационных индексов (NDVI, CiGreen, NDRE

и NDMI) построен алгоритм классификации сенокосных угодий и определения дат сенокосения. Алгоритм приведен для наиболее часто используемого индекса NDVI.

— построены карты пространственного распределения индекса NDVI сенокосных полей № 34 и 35 по спутниковым данным Sentinel-2 за даты (18 июня, 10 июля и 27 августа). Полученные карты позволяют выявлять сенокосные поля и даты сенокосения на больших территориях. Поля № 34 и 35 имеют площади 108 и 132 га соответственно.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Внешнее финансирование отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ботвич И.Ю., Письман Т.И., Кононова Н.А., Шевырнов А.П. Сезонная динамика растительности залежных земель Красноярской лесостепи по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 6. С. 39–51.
- Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Лапенко Н.Г., Самофал Е.В., Сторчак И.Г. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66.
- Кононова Н.А., Ларько А.А., Емельянов Д.В., Ботвич И.Ю. Оценка состояния сенокосных земель красноярского края на основе наземной спектрометрии // Вестник КрасГАУ. 2019. № 2. С. 31–37.
- Кострова Ю.Б., Костров Б.В. Использование дистанционного зондирования земли в целях повышения эффективности сельскохозяйственного производства // Вестник РГАУ, 2010. № 3. С. 88–90.
- Лапенко Н.Г., Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г., Дудченко Л.В., Шестакова Е.О. Деграционные процессы в степных сообществах и данные дистанционного зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 50–53.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11011>
- Ларько А.А., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В., Кононова Н.А. Оценка состояния сенокосных угодий на основе наземной и спутниковой спектрометрии // Вестник КрасГАУ. 2020. № 2. С. 11–17.
<https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-2-11-17>
- Родионова А.В., Тебердиев Д.М. Продуктивность долголетнего сеяного сенокоса и плодородие дерново-подзолистых почв // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. № 10. С. 178–182.
- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Lascano R.J. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data // In Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA. 2000. V. 1619.
- Bayat B., Tol C., Verhoef W. Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion // Remote Sens. 2016. 8. 557.
<https://doi.org/10.3390/rs8070557>
- Bretas I.L., Valente D.S.M., Silva F.F., Chizzotti M.L., Paulino M.F., D'Aurea A.P., Paciullo D.S.C., Pedreira B.C., Fernanda H.M. Chizzotti F.H.M. Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in *Brachiaria* pastures by combining meteorological data and satellite imagery // Grass and Forage Science. 2020.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12517>
- Erunova M.G., Simakina A.S., Yakubailik O.E. Smart analysis of agricultural land use with NDVI at Kuraginskoye agricultural experimental production facility // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 677. 2021. 032105.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032105>
- Gao B.C. A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // In SPIE's 1995 Symposium on OE, Aerospace Sensing and Dual Use Photonics. 1995. V. 2480.
- Gitelson A.A., Vina A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // Geophys Res Lett. 2005. 32: L08403.
<https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Gitelson A.A., Gritz U., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // J. Plant Physiol. 2003. 160: 271–82.
- Kolecka N., Ginzler C., Pazur R., Price B., Verburg P. H. Regional Scale Mapping of Grassland Mowing Frequency with Sentinel-2 Time Series // Remote Sens. 2018. 10. 1221.
<https://doi.org/10.3390/rs10081221>
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N. The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields // Biophys. 2019. 64(4). P. 588–592.
- Richter R., Schlöpfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide", DLR IB 565-01/11, Wessling, Germany, 2011. (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>).
- Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. 1974. V. 1. P. 48–62.

Grassland Monitoring Based on Geobotanical, Ground, Spectrometric and Satellite Data

I. Yu. Botvich¹, N. A. Kononova¹, D. V. Emelyanov¹, and T. I. Pisman¹

¹Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

The study assessed the possibility of grassland monitoring based on various spectral vegetation indices (NDVI, CIGreen, NDRE, NDMI) calculated according to Sentinel-2 satellite data during the 2018 growing sea-

son. Geobotanical studies and collection of ground-based spectrophotometry data were carried out simultaneously, at the same time of day, and were used as an additional stage of haymaking monitoring. It was possible to identify grasslands and determine the date of mowing based on ground and satellite spectrometric data. A drop in the indices (NDVI, cIGreen, NDRE, NDMI) was observed on the date of mowing (25.07.2018). The possibility of grassland interpretation based on the NDVI index was proven reliable. It was shown that the dates of mowing determined according to satellite data were in good agreement with the ground dates of mowing (July 25th and August 27th). The spatial distribution maps of the NDVI index of grasslands according to Sentinel-2 satellite data for certain dates (June 18th, July 10th, and August 27th) were drawn. The resulting maps make it possible to identify grasslands and mowing dates in large areas.

Keywords: grassland, satellite data, Sentinel-2, Spectral Evolution, NDVI, cIGreen, NDRE, NDMI

REFERENCES

- Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Lascano R.J. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data // In Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, MN, USA.2000. V. 1619.
- Bayat B., Tol C., Verhoef W. Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion // Remote Sens. 2016. 8. 557.
<https://doi.org/10.3390/rs8070557>.
- Botvich I.Yu., Pisman T.I., Kononova N.A., Shevyrnogov A.P. Sezonnaya dinamika rastitel'nosti zaleznykh zemel' Krasnoyarskoj lesostepi po nazemnym i sputnikovym dannym [Seasonal dynamics of fallow land vegetation in Kras-3 Research Earth from space. 2018. № 6. P. 39–51. (In Russian).
- Bretas I.L., Valente D.S.M., Silva F.F., Chizzotti M.L., Paulino M.F., D'Aurea A.P., Pacullo D.S.C., Pedreira B.C., Fernanda H.M. Chizzotti F.H.M. Prediction of aboveground biomass and dry-matter content in *Brachiaria* pastures by combining meteorological data and satellite imagery // Grass and Forage Science. 2020.
<https://doi.org/10.1111/gfs.12517>.
- Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G. Vozmozhnosti distancionnoj ocenki sostoyaniya i stepeni degradacii prirodnykh kormovykh ugodij [Possibilities of remote assessment of the state and degree of degradation of natural fodder lands] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2018. T. 15. № 7. P. 53–66. (In Russian).
- Erunova M.G., Simakina A.S., Yakubailik O.E. Smart analysis of agricultural land use with NDVI at Kuraginskoye agricultural experimental production facility // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 677. 2021. 032105.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/3/032105>.
- Gao B.C. A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // In SPIE's 1995 Symposium on OE, Aerospace Sensing and Dual Use Photonics.1995. Vol. 2480.
- Gitelson A.A., Vina A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops // Geophys Res Lett. 2005. 32: L08403,
<https://doi.org/10.1029/2005GL022688>.
- Gitelson A.A., Gritz U., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // J. Plant Physiol. 2003. 160: 271–82.
- Kolecka N., Ginzler C., Pazur R., Price B., Verburg P.H. Regional Scale Mapping of Grassland Mowing Frequency with Sentinel-2 Time Series // Remote Sens. 2018. 10. 1221,
<https://doi.org/10.3390/rs10081221>.
- Kononova N.A., Larko A.A., Emelyanov D.V., Botvich I.Yu. Ocenka sostoyaniya senokosnykh zemel' krasnoyarskogo kraja na osnove nazemnoj spektrometrii [Assessment of hay lands based on ground-based spectrometry (on the example of agricultural land of the Krasnoyarsk region)] // The Bulletin of KrasGAU. 2019. № 2. P. 31–37. (In Russian).
- Kostrova Y.B., Kostrov B.V. Ispol'zovanie distancionnogo zondirovaniya zemli v celyakh povysheniya effektivnosti sel'skohozyajstvennogo proizvodstva [Using soil remote sensing to improve agricultural production efficiency] // Vestnik RGATU. 2010. № 3. P. 88–90. (In Russian).
- Lapenko N.G., Eroshenko F.V., Storchak I.G., Dudchenko L.V., Shestakova E.O. Degradacionnye processy v stepnykh soobshchestvakh i dannye distancionnogo zondirovaniya Zemli [Degradation processes in steppe communities and Earth remote sensing data]// Achievements of Science and Technology of AIC. 2018. T. 32. № 10. P. 50–53. (In Russian).
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11011>
- Larko A.A., Botvich I.Yu., Emelyanov D.V., Kononova N.A. Ocenka sostoyaniya senokosnykh ugodij na osnove nazemnoj i sputnikovoj spektrometrii [The assessment of the state of grasslands on the basis of ground and satellite spectrometry] // The Bulletin of KrasGAU. 2020. № 2. P. 11–17. (In Russian).
<https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-2-11-17>
- Pisman T.I., Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Shpedt A.A., Trubnikov Y.N. The Information Content of Spectral Vegetation Indices in the Interpretation of Satellite Images of Cultivated Fields // Biophys. 2019. 64(4). P. 588–592.
- Richter R., Schl pfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide", DLR IB 565-01/11, Wessling, Germany, 2011.
(<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm>).
- Rodionova A.V., Teberdiev D.M. Produktivnost' dolgoletnego seyanogo senokosa i plodorodie dernovo-podzolistykh pochv [Productivity of long-term seeded hayfields and fertility of soddy-podzolic soils] // Advances in modern science. 2017. T. 1. №1 0. P. 178–182. (In Russian).
- Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. 1974. V. 1. P. 48–62.