

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ИНФОРМАТИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ
ДЛЯ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ЛУГОВОЙ И СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ
ХАКАСИИ ПО НАЗЕМНЫМ И СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2024 г. А. П. Шевырнов¹, И. Ю. Ботвич¹*, Т. И. Письман¹, А. И. Волкова²,
Н. А. Кононова¹, С. А. Иванов¹

¹Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

²Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия

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

Поступила в редакцию 02.08.2023 г.

В статье представлены результаты оценки возможности идентификации луговой и степной растительности Хакасии по наземным и спутниковым данным MODIS и LANDSAT 8 в течение вегетационного сезона 2017 г. По результатам полевых геоботанических исследований показано, что продуктивность растительности луга превышает продуктивность степной растительности. В результате наземных спектральных измерений показано, что мониторинг спектральной отражательной способности луговой и степной растительности может использоваться для их идентификации. При анализе спутниковых данных MODIS (на основе индекса NDVI, усовершенствованного индекса EVI, индекса влажности земной поверхности LSWI, индекса листовой поверхности LAI, интенсивности поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR и чистой первичной продукции NPP) выявлено, что значения исследованных индексов для луговой растительности значительно превышают значения для степной растительности. В то же время радиационная температура LST для степной растительности выше, чем для луговой. Определены высокие положительные корреляционные связи между вегетационными индексами, характеризующими биомассу (NDVI, EVI, LAI, NPP) и гидротермическими условиями (LSWI, FPAR) для луговой и степной растительности. Однако коэффициенты корреляции между NDVI и LST, EVI и LST для степной растительности низкие. На основе полученных карт пространственного распределения индекса NDVI луговой и степной растительности по данным Landsat 8 за 29 июля показано, что индекс NDVI достоверно различается для исследуемых типов растительности. Для луговой растительности значение NDVI значительно больше, чем для степной.

Ключевые слова: растительность, спутниковые данные, MODIS, LANDSAT 8, вегетационные индексы, наземное спектрофотометрирование, геоботанические исследования, луг, степь

DOI: 10.31857/S0205961424010028, EDN: GNCMTK

ВВЕДЕНИЕ

Природные экосистемы суши обладают многообразными функциями. Они являются источником биологических ресурсов для человека, естественными хранилищами видового разнообразия и важными регуляторами биогеохимических циклов многих веществ, включая воду и диоксид углерода.

В настоящее время первостепенное значение имеет задача сохранения биологического разнообразия луговых и степных экосистем. Особенно это актуально для Хакасии, поскольку растительность республики активно используется в качестве сенокосов и пастбищ.

Природная растительность республики Ха-

касия, используемая для выпаса и сенокошения, сформировалась и существует в течение многих тысячелетий. Но бессистемное ее использование привело к тому, что большая часть площади таких травостоев находится на разных стадиях пастбищной дигрессии. Это остается одной из актуальных проблем Хакасии.

Для интенсификации животноводства требуется создание устойчивой кормовой базы, в том числе за счет лугового кормопроизводства, важного источника производства объемистых кормов. Поддержание высокой урожайности фитоценозов на сенокосах и пастбищах является одной из задач луговодства (Родионова, Тебердиев, 2017).

Являясь источником биологически ценных кормов из дикорастущих трав, природные кормовые угодья (сенокосы и пастбища) 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 трудоемкости и больших размеров территорий, требующих обследования, не способны обеспечить регулярное получение информации с достаточно высоким уровнем точности (Ерошенко и др., 2018).

Анализ динамики естественных объектов, содержащих растительные компоненты, давно и успешно проводится с применением данных дистанционного зондирования Земли из космоса для различных регионов, как северных, так и южных (Бондур, Воробьев, 2015). Изменение растительного покрова, происходящее в течение вегетационного периода, а также в результате болезней, воздействия вредителей, антропогенного вмешательства приводит к изменению спектральных отражательных характеристик (Шукилович и др., 2016).

Спутниковый мониторинг температуры поверхности Земли из космоса реализуется уже несколько десятилетий. Результаты дистанционного определения температуры подстилающей поверхности по спутниковым данным используются в задачах численного анализа и прогноза погоды, гидрологии и агрометеорологии, исследованиях климата и глобальных изменений (Поляков и др., 2010).

Получение надежных оценок водообеспеченности больших по площади территорий сельскохозяйственных районов является важной задачей для организации рационального водопользования и успешного ведения сельского хозяйства. Оценки количества выпадающих осадков, запасов почвенной влаги, как одного из основных показателей водообеспеченности, могут быть объединены в рамках исследования динамики водного режима территорий (Музылев и др., 2019).

В работе Adamovich et al., (2019) показаны возможности использования мультиспектральных данных дистанционного зондирования Земли и полевых исследований для выделения растительных сообществ на примере государственного природного заказника “Пижемский” Кировской области. Использование нормализованного дифференцированного вегетационного индекса NDVI позволило выделить сосновые, лиственные леса и луговые

фитоценозы, а также распознать водные объекты и открытые почвы.

Цель данной работы – оценка возможности идентификации луговой и степной растительности Хакасии по наземным и спутниковым данным MODIS и LANDSAT в течение вегетационного сезона 2017 г. Для этого будут использованы различные вегетационные индексы и показатели (нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI, усовершенствованный вегетационный индекс EVI, индекс влажности земной поверхности LSWI, индекс листовой поверхности LAI, интенсивность поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR, чистая первичная продукция NPP и радиационная температура LST).

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования. Исследования проводились на двух стационарных участках, различающихся по типам растительности, расположенных в Ширинском районе республики Хакасия в течение вегетационного сезона 2017 г. (рис. 1). Участок № 1 (далее – луг) располагается в предгорьях Кузнецкого Алатау у северо-восточного подножия г. Кошкулук в междуречье р. Колоджул и р. Кокчул (N54.51984, E89.73734). Участок № 2 (далее – степь) располагается в окрестностях с. Ворота в 50 км от районного центра п. Шира (N54.70534, E90.53529).

Ширинский район Республики Хакасия располагается в ее северо-западной части и занимает территорию 6809 кв. км. По характеру природных условий территория Ширинского района принадлежит двум крупным географическим провинциям – горной системе Кузнецкого Алатау и Чебаково-Балахтинской впадине Минусинской котловины, являющимися составной частью Алтае-Саянской горной области.

Климат Ширинского района резко-континентальный, с холодной зимой и прохладным летом. Выпадение осадков по территории неравномерное. В центральной части Ширинского района за год их количество составляет от 340 до 460 мм. Осадки имеют ярко выраженный летний тип (за наиболее важный период активной вегетации растений их выпадает 40–50%). Минимум осадков приходится на май, максимум – на июль-август.

Объектом исследования являлись растительные сообщества настоящего суходольного злаково-разнотравного луга (участок № 1 – луг) и настоящей мелкодерновинной степи (участок № 2 – степь), имеющие существенные различия в структурно-функциональной организации растительного покрова.

Наземные (геоботанические) методы исследований.

Полевые геоботанические исследования проводились в течение вегетационного сезона 2017 г. (даты выездов: 3 июня, 18 июля, 27 августа). Исследуемые территории относятся к луговому и степному типу растительности. При проведении геоботанических описаний определены видовой состав растений, структура фитоценозов, продуктивность (сырая надземная фитомасса) и общее проективное покрытие травостоя.

Для определения сырой надземной фитомассы в пределах каждой пробной площадки (100 м²) были взяты укосы с 1 м² в четырехкратной повторности. Укосы разбирались по следующим ботаническим группам: осоки, злаки, бобовые, полыни, остальное разнотравье. Предварительно определялась общая сырая масса укосов (Зоркина, 2003). Все полученные результаты пересчитывались в г/м².

Проективное покрытие определено визуально. Проективное покрытие является одним из ключевых параметров растительного покрова и характеризует степень покрытия почвы фитомассой растений. Математически проективное покрытие определяется как отношение проекции побегов и листьев к общей площади участка и выражается в долях или процентах. Латинские названия приведены по сводке Черепанова (1995).

Наземные спектрофотометрические методы. Наземные измерения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) проводились одновременно с геоботаническими исследованиями в течение вегетационного сезона 2017 г. (03.06; 18.07; 27.08). Для проведения наземной спектрометрии использовался 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., 2017). 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. Измерение КСЯ травянистой растительности с помощью спектрорадиометра проводилось на одних и тех же тестовых участках в разные периоды вегетации. Измерения выполнялись с 11 до 15 часов местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало близкие условия освещения объектов.

Спутниковые данные. Для анализа сезонной динамики луговой и степной растительности использовались следующие вегетационные индексы и показатели по данным MODIS:

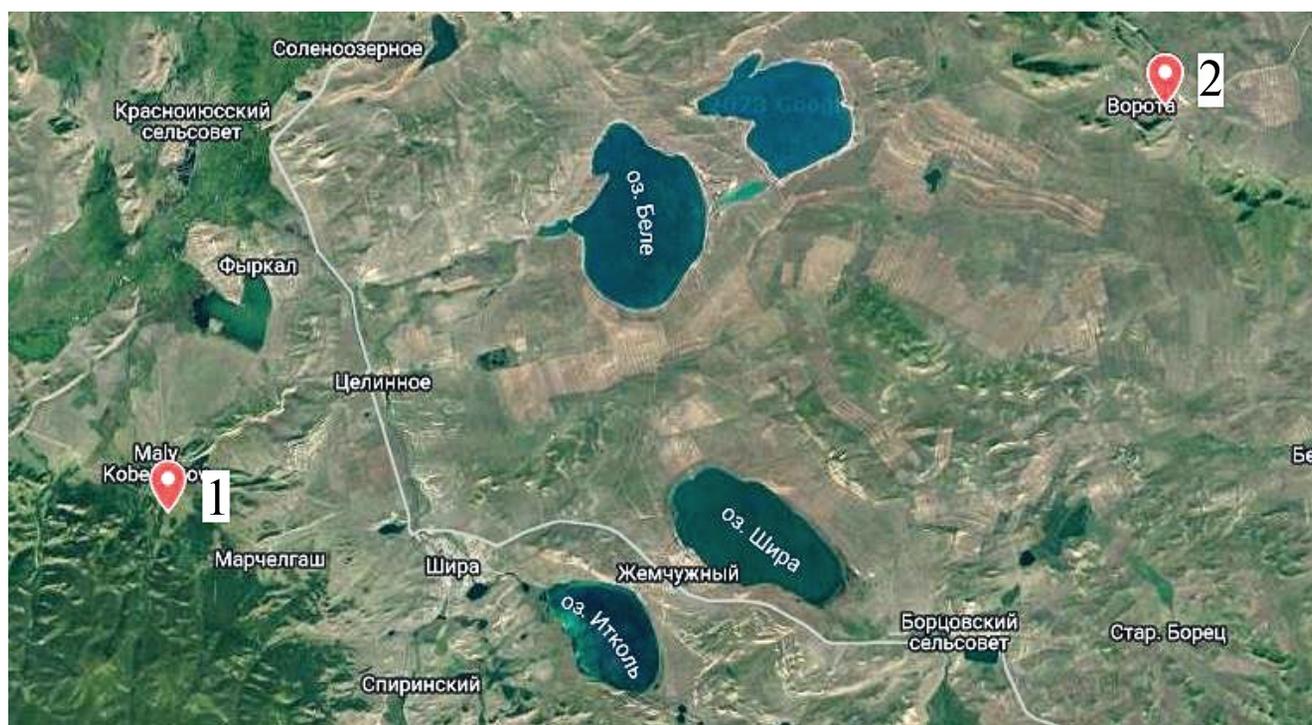


Рис. 1. Карта расположения исследуемых площадок Ширинского района, где 1 – луг; 2 – степь (описание участков находится в тексте).

– Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Индекс NDVI вычисляется по формуле:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red),$$

где NIR – отражение в ближней ИК-области, RED – отражение в красной области спектра (Rouse et al., 1974).

– Усовершенствованный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index) – улучшенный индекс биомассы растений, представляющий собой модификацию нормализованного относительного индекса растительности NDVI. Индекс EVI вычисляется по формуле:

$$EVI = (NIR - Red) / (NIR + C1 \times Red - C2 \times BLUE + L) \times (1 + L),$$

где Blue – отражение в синей области спектра. Коэффициенты C1, C2 и L эмпирически установлены равные 6,0, 7,5, и 1 соответственно (Rouse et al., 1974).

– Индекс влажности земной поверхности LSWI (Land Surface Water Index) рассчитывается при использовании коротковолновых (SWIR) и ИК (NIR) областей электромагнитного спектра. В SWIR наблюдается сильное поглощение света водой, и известно, что LSWI чувствителен к общему количеству воды в растительности и ее почвенном фоне (Xiao et al., 2002).

– Индекс листовой поверхности LAI (Leaf Area Index), определяемый как отношение общей площади “односторонней” (“освещенной”) листовой поверхности к единице площади горизонтальной проекции кроны на поверхность земли (Justice et al., 1998).

– Интенсивность поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) позволяет оценить долю радиации в “фотосинтетически активном” диапазоне волн (380–710 нм), поглощаемую растительным покровом (Барталев и др., 2011).

– Значения чистой первичной продукции NPP (Net Primary Productivity) были получены на основе данных сканера MODIS спутника Terra. В работе использовался продукт MOD17. Данные представляют собой композитные изображения, временной шаг восемь дней, рассчитанные на основе модели MODIS NPP (Ларько и др., 2015). Чистая первичная продукция обусловлена продукционным процессом и является важным показателем круго-

ворота (или цикла) углерода в экосистемах. NPP означает интенсивность накопления органического вещества и углерода за определенный период времени (т·га·1·год⁻¹, или т С·га·1·год⁻¹, или г/м² сут) (Justice et al., 1998).

– Радиационная температура (LST), восстановленная по спутниковым данным, дает информацию о температуре поверхности исследуемого объекта (верхней границы растительного покрова, почвы). Данные о радиационной температуре восстановлены по измерениям радиометром MODIS в тепловых ИК-каналах (Соловьев, Успенский, 2009).

Для определения вегетационных индексов NDVI, EVI, LSWI используются спутниковые снимки с пространственным разрешением 250 и 500 м (продукты MOD09Q1, MOD09A1). Для определения показателей растительности NPP, FPAR, LAI и радиационной температуры LST используются спутниковые изображения с пространственным разрешением 1 км (продукты MOD17A2H, MOD15A2H, MOD11A2).

Карты пространственного распределения индекса NDVI луговой и степной растительности Хакасии получены по данным Landsat за 29 июля 2017 г. Пространственное разрешение – 30 м.

Используемые длины волн при расчете NDVI: для Modis красный канал – 620–670 нм, БИК – 841–876 нм; для Landsat-8 – 630–680 нм и 845–885 нм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наземное геоботаническое исследование. Накопление фитомассы является одной из основных эколого-биологических характеристик, отражающих функциональное состояние растительного покрова. Величина наземной фитомассы и соотношение ее основных компонентов зависит в значительной мере от видового состава растительности, проективного покрытия травостоя, а также от степени антропогенного воздействия.

В табл. 1 представлена продуктивность злаково-разнотравного растительного сообщества, которое относится к луговому типу (настоящий суходольный луг). Оно расположено на равнинном участке, окруженным со всех сторон березово-лиственничным лесом с остепненным разнотравно-злаковым покровом. Структура травостоя сложная, включает практически все виды хозяйственно-ботанических групп. В начале вегетационного сезона отмечено высокое обилие разнотравья, состоящего из раннелетнецветущих видов, имеющих короткий жизненный цикл. В середине вегетационного сезона происходит смена доминирующих видов, доля разнотравья возрастает до 74%. Заметно

Таблица 1. Продуктивность растительности настоящего суходольного злаково-разнотравного луга и настоящей мелкодерновинной степи в течение вегетационного сезона 2017 г.

Настоящий суходольный злаково-разнотравный луг	Продуктивность, г/м ²	Продуктивность, г/м ²	Продуктивность, г/м ²
Злаково-разнотравное сообщество	Июнь	Июль	Август
Злаки	92	56.4	376
Разнотравье	630.4	843.36	170.4
Осоки	69.2	50.72	–
Бобовые	40	119.2	63.2
Полыни	–	–	–
Ветошь	173.2	70.2	38.08
Сумма	831.6	1069.76	609.6
Разнотравно-злаково-полынное сообщество	Июнь	Июль	Август
Злаки	8	42.24	14.32
Разнотравье	3.4	8.04	11.96
Осоки	38.8	3.72	35.2
Бобовые	–	–	–
Полыни	42.4	17.36	188.96
Ветошь	38	59.44	29.36
Сумма	92.6	71.36	250.44

участие бобовых (10%). Злаковая основа имеет минимальное участие. В конце вегетационного сезона происходит завершение жизненного цикла у доминирующего разнотравья, доля злаков составляет 64%.

Разнотравно-злаково-полынное растительное сообщество (табл. 1) относится к настоящим мелкодерновинным степям. Сообщество, подверженное пастбищной нагрузке, находится на крутом склоне в условиях избыточной инсоляции, что приводит к формированию разреженного травостоя с низким проективным покрытием. Структура травостоя сложная, характеризуется небольшим участием разнотравья. Обилие осок и полыни свидетельствует о низкой кормовой ценности сообщества. В середине вегетационного сезона заметно возрастает участие злаков. В конце вегетационного сезона, за счет наступления плодоношения доминирующей полыни, участие последней возрастает до 54%.

Видовой состав и динамика проективного покрытия настоящего суходольного злаково-разнотравного луга и настоящей мелкодерновинной степи представлено в табл. 2. Злаково-разнотравное растительное сообщество относится к настоящим суходольным лугам. Общее проективное покрытие фитоценоза 80–100%. Травостой в основном равномерный по видовому составу (табл. 2). Высота травостоя с учетом генеративных побегов крупного

разнотравья может достигать 120 см., но основная доля фитомассы сосредоточена до 55–60 см. Ведущую фитоценотическую роль в формировании злаково-разнотравного сообщества выполняют 5 видов. В основном это: овсяница луговая, тимофеевка степная, лютик многоцветковый, осока стоповидная и тмин обыкновенный.

Разнотравно-злаково-полынное растительное сообщество относится к настоящим мелкодерновинным степям (табл. 2.) Оно располагается в нижней трети склона южной экспозиции урочища Гора Разлуки окрестностей вблизи села Ворота. Общее проективное покрытие фитоценоза – 30–55%. Видовая насыщенность на 1м² – 14–16 видов. Ведущую фитоценотическую роль выполняют 5 видов. В основном это: тонконог гребенчатый, овсяница валлиская, ковыль волосатик, овсяница ложноовечья, типчак и полынь холодная.

Далее проводится анализ связи геоботанических свойств объектов с изменчивостью спектрофотометрических характеристик, определяемых методом ДЗЗ.

Наземная спектрофотометрия. Использование наземных спектральных оптических измерений становится одним из актуальных и востребованных методов полевого изучения растительности. Известно, что спектры отражения растительных сообществ качественно и количественно зависят от

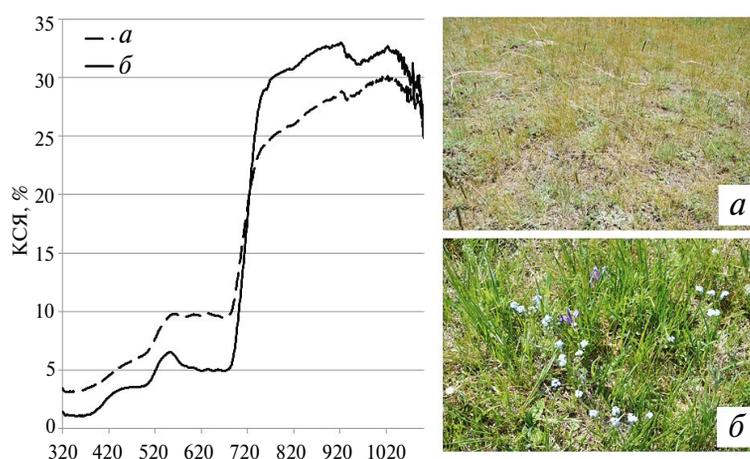
Таблица 2. Доминирующий видовой состав и динамика проективного покрытия (ПП) настоящего суходольного злаково-разнотравного луга и настоящей мелкодерновинной степи в течение вегетационного сезона 2017 г.

	Настоящий суходольный злаково-разнотравный луг	Июнь	Июль	Август
	Злаково-разнотравное сообщество	ПП, %	ПП, %	ПП, %
Вид растения				
1	Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i> Huds.)	4	5	6
2	Тимофеевка степная (<i>Phleum phleoides</i> (L.) Karst)	6	8	8
3	Осока стоповидная (<i>Carex pediformis</i> C.A. Mey.)	4	2	2
4	Лютик многоцветковый (<i>Ranunculus polyanthemos</i> L.)	6	4	3
5	Тмин обыкновенный (<i>Carum carvi</i> L.)	3	4	5
Настоящая мелкодерновинная степь				
Разнотравно-злаково-полынное сообщество				
Вид растения				
1	Тонконог гребенчатый (<i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers.)	8	6	4
2	Овсяница валлиская (<i>Festuca valesiaca</i> Gaudin)	4	3	2
3	Ковыль волосатик (<i>Stipa capillata</i> L.)	2	2	3
4	Овсяница ложноовечья, типчак (<i>Festuca pseudovina</i> Hack. Ex Wiesb.)	4	2	1
5	Полынь холодная (<i>Artemisia frigida</i> Willd.)	4	6	10

видового состава фитоценоза, содержания влаги, фенологического состояния, условий произрастания и других факторов. Спектральные данные, полученные при наземных измерениях КСЯ, можно использовать для интерпретации спутниковых измерений и мониторинга растительного биоразнообразия. Изучение травянистых растительных сообществ на выбранных подспутниковых участках с помощью полевого спектрометра в течение вегетационного сезона (рис. 2) проводилось для отработки методов повышения точности дешифрирования растительности.

Параметры растительного покрова существенно влияют на отражательные свойства системы почва–растительность. Установлено, что при относительно небольшом количестве зеленой массы (степь) спектры отличаются меньшим спектральным контрастом в различных участках спектра (рис. 2, кривая а). При увеличении зеленой массы (луг) характер кривых КСЯ изменяется, постепенно приобретая признаки, характерные для зеленой растительности (рис. 2, кривая б).

Спутниковый мониторинг. На основе спутниковых данных MODIS приводится анализ сезонной

**Рис. 2.** График коэффициента спектральной яркости (КСЯ) растительности настоящей мелкодерновинной степи (а) и настоящего суходольного злаково-разнотравного луга (б) и их фотоизображения (4–5 июня 2017 г.).

динамики различных вегетационных индексов и показателей, характеризующих вегетирующую луговую и степную растительность и гидротермические условия на изучаемой территории.

На рис. 3 представлены результаты сезонной динамики индексов NDVI и EVI растительности луга и степи, различающихся между собой доминирующими видами и продуктивностью (табл. 1 и 2).

Из рисунка 3 видно, что в летний период (июнь–август) вегетационный индекс NDVI луговой растительности значительно выше индекса NDVI степной растительности. Известно, что чем выше значения индекса, тем больше объем фитомассы. Это подтверждают результаты геоботанических исследований (табл. 1). Фитомасса злаково-разнотравного сообщества (луг) превышает фитомассу разнотравно-злаково-полынного сообщества (степь). Кроме того, на значения индекса NDVI влияет видовой состав растительности (табл. 2), ее сомкнутость, состояние, экспозиция склонов и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. В местах понижений (долинах рек, оврагах) значения NDVI больше, чем на возвышенных участках.

На подавляющем большинстве используемых аграрных угодий как минимум раз в год происходит распашка. Т.е. в эти сроки обрабатываемое поле должно характеризоваться признаками оголенной почвы, которые соответствуют более низким значениям вегетационного индекса NDVI, чем растительный покров (Барталев и др., 2011; Савин и др., 2015).

В сезонной динамике NDVI исследуемых участков отмечено отсутствие снижения вегетационного

индекса до низких значений, соответствующих значениям оголенной почвы. Следовательно, в течение сезона на исследуемых участках не производилась распашка.

Известно, что индекс NDVI не является идеальным показателем состояния растительности и надземной фитомассы. Это связано как с “насыщением” этого индекса при высокой сомкнутости посевов и его выхода на плато, так и с влиянием отражательных свойств поверхности почв на его величину при низкой сомкнутости посевов. В случае, если густота растительного покрова достигает величины 70–80%, индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона. Если густота растительного покрова меньше 30% и более 80%, то применять NDVI не всегда рационально (Савин и др., 2015).

В связи с этим проведен анализ сезонной динамики усовершенствованного вегетационного индекса EVI (рис. 3). Индекс EVI позволяет оценивать состояние растений как в условиях густого растительного покрова, так и в условиях разреженной растительности. Этот индекс при оценке состояния растений имеет преимущества, поскольку влияние почвы и атмосферы в значениях данного индекса минимизировано. Необходимо отметить, что сезонный тренд значений индекса EVI дает во многом аналогичную картину сезонному тренду NDVI, как луговой, так и степной растительности. Это говорит о возможности использования в ряде случаев индекса EVI. Анализ сезонной динамики индекса EVI также не обнаруживает признаков вспашки на исследуемой территории.

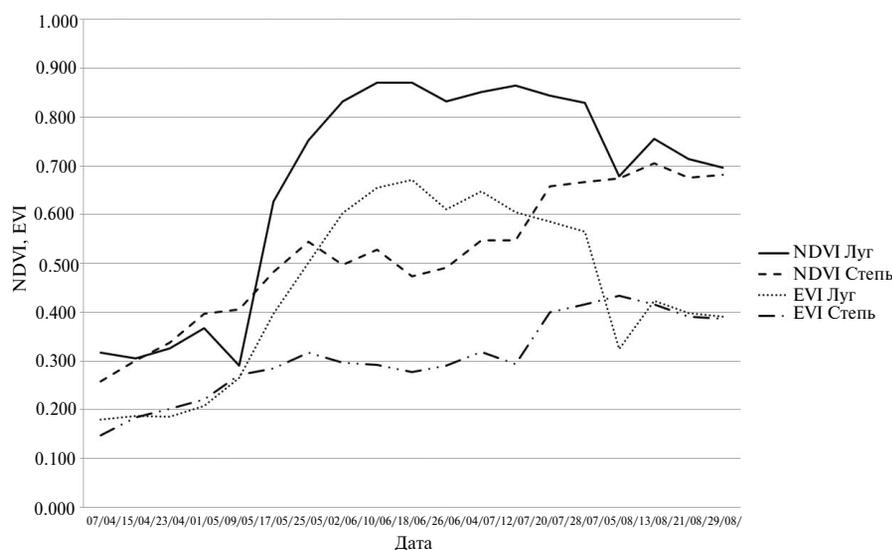


Рис. 3. Сезонная динамика вегетационных индексов NDVI и EVI луговой и степной растительности Хакасии.

Основное влияние на состояние растительного покрова оказывают выпадающие осадки. Однако и влажность почвы вносит свой вклад в фотосинтез растений, влияет на интенсивность вегетационного процесса. В процессе формирования и роста растений определяющую роль играют условия увлажнения в начале вегетации. Устойчивый переход среднесуточной температуры через 10°C в сторону ее повышения при достаточном увлажнении считается в агроклиматологии началом сезона активной вегетации (Черенкова, 2011).

Индекс влажности земной поверхности (LSWI) может использоваться для контроля за увеличением содержания жидкой воды в почве и растительности, особенно в начале сезона (Chandrasekar et al., 2010). Анализ сезонной динамики индекса LSWI показывает, что для луговой растительности значение индекса LSWI превышает значение LSWI для степной растительности (рис. 4). Известно, что различия условий местообитаний по увлажнению сказываются на показателях фитомассы. По-видимому, повышенное содержание воды в почве и растительности является одной из причин наличия большей фитомассы на участке “Луг”, чем на участке “Степь”. В результате анализа сезонной динамики индекса LSWI и индекса NDVI как для луговой растительности, так и для степной, выявлена их высокая положительная корреляционная зависимость (табл. 3). В результате анализа связи индекса LSWI и усовершенствованного вегетационного индекса (EVI) также выявлена их высокая положительная корреляция.

Так как фотосинтез является основной частью продукционного процесса, то изучение влияния

функционирования ассимиляционного аппарата на NDVI, EVI и LAI растений является важным и актуальным направлением исследований в области использования данных дистанционного зондирования Земли в биологии и сельском хозяйстве.

Сезонная динамика доли фотосинтетически активной радиации, поглощаемой растительностью, FPAR для луговой и степной растительности аналогична динамике влажности LSWI (рис. 4). В результате анализа связи FPAR и индексов NDVI и EVI для обоих участков также выявлена высокая положительная корреляционная зависимость (табл. 3).

Индекс листовой поверхности (LAI) является мерой фотосинтезирующей биомассы. Чем выше индекс, тем более полно используется солнечный свет на этой территории. Анализ сезонной динамики листового индекса LAI луговой территории показал, что в летний период его максимальное значение достигает 4, тогда как для степной растительности индекс LAI достигал только 1.7 (рис. 5). Таким образом, индекс LAI так же, как индексы NDVI и EVI, можно использовать для идентификации типа растительности. В результате анализа связи показателя FPAR и индекса LAI также выявлена высокая положительная корреляция для обоих участков (табл. 3), что подтверждает эффективное использование солнечного света (рис. 4 и 5).

Чистая первичная продукция (NPP) является одним из показателей, которые позволяют проследить изменения в растительных сообществах, в первую очередь изменения их продуктивности во времени на определенной территории. Чистая первичная продукция представляет собой количество



Рис. 4. Сезонная динамика индекса влажности земной поверхности LSWI и интенсивности поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR луговой и степной растительности Хакасии.

углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы благодаря процессу фотосинтеза. Значения NPP отличаются как для различных растительных биомов, так и для одинаковых растительных сообществ, произрастающих в разных природных условиях (Ларько и др., 2015). Величина чистой первичной продукции служит показателем функционирования любой экосистемы, в т.ч. лугового и степного сообщества.

Сезонная динамика чистой первичной продукции (NPP) луговой и степной растительности представлена на рис. 6. Весной и в начале лета происходит интенсивное накопление органического вещества и углерода в растениях. В результате максимум значения NPP смещен в начало летнего

периода и затем происходит плавное падение NPP до конца осени. При этом максимальное значение NPP лугового сообщества значительно превосходит NPP степного сообщества.

Динамика NPP травянистой растительности во времени обусловлена внешними факторами (температурно-влажностный режим, антропогенное воздействие и др.) и внутренними (возраст, видовая структура и другие характеристики растительного ценоза).

Температура поверхности суши является одним из основных параметров при описании физических процессов на поверхности Земли. Данные о температуре различного пространственного и временного разрешения требуются для обнаружения

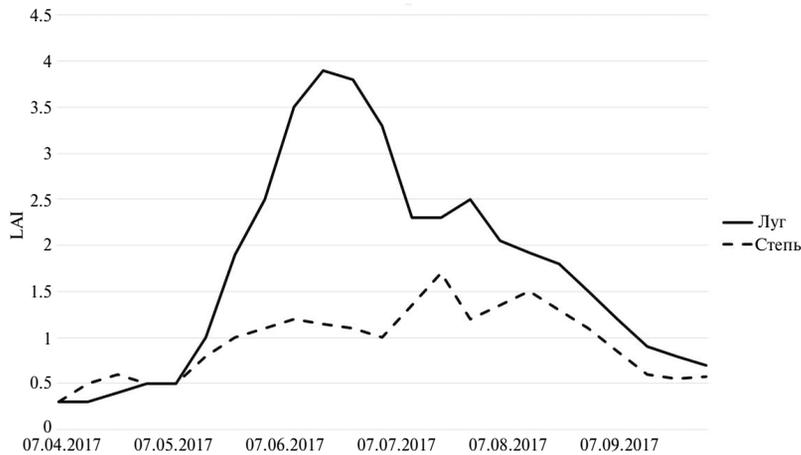


Рис. 5. Сезонная динамика вегетационного индекса LAI луговой и степной растительности Хакасии.



Рис. 6. Сезонная динамика радиационной температуры LST и чистой первичной продукции NPP луговой и степной растительности Хакасии.

Таблица 3. Корреляция между вегетационными индексами и показателями, характеризующими растительность и гидро-термические условия (коэффициент корреляции Пирсона, r)

	LSWI луг	LSWI степь	LST луг	LST степь	FPAR луг	FPAR степь
NDVI луг	0.954	–	0.582	–	0.961	–
NDVI степь	–	0.918	–	0.221	–	0.915
EVI луг	0.983	–	0.586	–	0.913	–
EVI степь	–	0.91	–	0.153	–	0.886
NPP луг	0.867	–	0.843	–	0.852	–
NPP степь	–	0.588	–	0.897	–	0.611
LAI луг	0.95	–	0.781	–	0.963	–
LAI степь	–	0.833	–	0.705	–	0.968

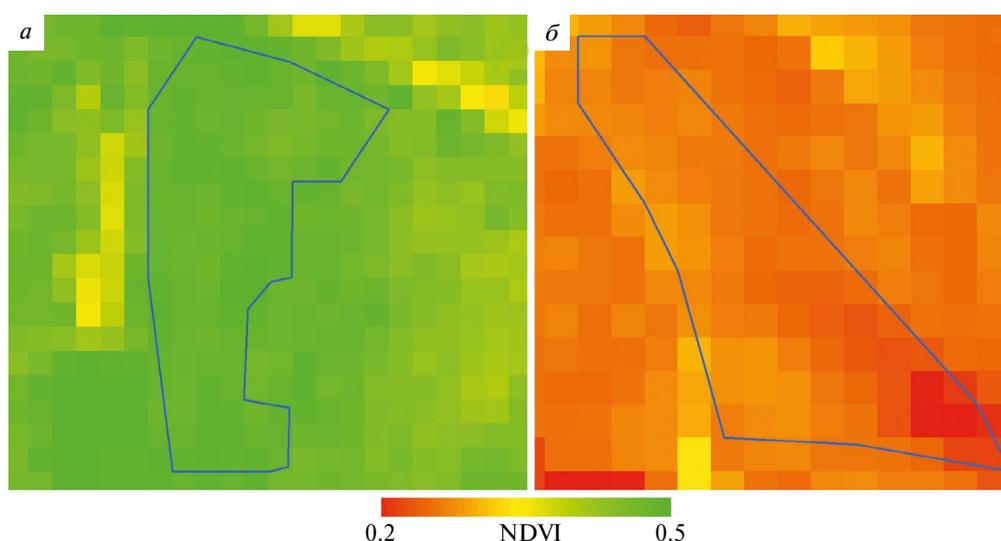
климатических изменений. Необходимость получения регулярных спутниковых данных о температуре подстилающей поверхности диктуется тем, что сеть наземных наблюдений температуры поверхности суши достаточно редкая (Соловьев, 2009).

Сезонная динамика радиационной температуры поверхности исследуемых участков (LST) (рис. 6) так же достигает максимального значения в конце июня, как и чистая первичная продукция (NPP). Наблюдается некоторое различие в апрельской динамике NPP и LST (рис. 6). При этом обнаружена достаточно высокая положительная корреляция между NPP и LST для обоих типов растительности ($r = 0.843$ для луга и $r = 0.897$ для степи) (табл. 3).

Следует отметить, что все исследованные индексы и показатели для луговой растительности выше, чем для степной. Исключением является радиационная температура LST, которая для степной растительности выше, чем для луговой (рис. 6).

По-видимому, это связано с тем, что по определению данный индекс дает информацию о температуре поверхности верхней границы растительного покрова и почвы. Возникает эффект экранирования прямого солнечного излучения растительностью. В данном случае почва участков со степной растительностью, когда растительный покров разреженный, оказывает больший эффект на LST, чем густая луговая растительность. Кроме того, необходимо отметить, что коэффициенты корреляции между NDVI и LST, EVI и LST для степной растительности низкие ($r = 0.221$ и $r = 0.153$) (табл. 3).

На рис. 7 представлено пространственное распределение индекса NDVI по данным LANDSAT 8 для луговой (а) и степной (б) растительности при высоком пространственном разрешении – 30 м за 29 июля 2017 г. В середине лета индекс NDVI достоверно различается для луговой (NDVI = 0.5) и степной (NDVI = 0.2) растительности.

**Рис.7.** Карты пространственного распределения индекса NDVI луговой (а) и степной (б) растительности Хакасии по данным Landsat 8 в 2017 г. Пространственное разрешение 30 метров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки возможности идентификации луговой и степной растительности Хакасии наземные и спутниковые исследования проводились на двух стационарных участках (№ 1 – луг) и (№ 2 – степь), расположенных в Ширинском районе республики Хакасия в течение вегетационного сезона 2017 г. Участок № 1 относится к настоящему суходольному злаково-разнотравному лугу, участок № 2 – к настоящей мелкодерновинной степи.

По результатам полевых геоботанических исследований определена продуктивность луговых и степных сообществ, видовой состав и динамика проективного покрытия травостоя. Показано, что продуктивность растительности настоящего суходольного злаково-разнотравного луга превышает продуктивность настоящей мелкодерновинной степи.

Полученные результаты наземных спектральных измерений показывают, что мониторинг спектральной отражательной способности различных сообществ даже при малых спектральных контрастах может использоваться для идентификации луговых и степных растительных сообществ.

При анализе спутниковых данных MODIS (на основе индекса NDVI, усовершенствованного индекса EVI, индекса влажности земной поверхности LSWI, индекса листовой поверхности LAI, интенсивности поглощения фотосинтетически активной радиации FPAR и чистой первичной продукции NPP) показана возможность идентификации лугового и степного типа растительности. Выявлено, что значения исследованных индексов для луговой растительности значительно превышают значения для степной растительности.

Выявлено, что значения радиационной температуры LST для степной растительности превышают значения для луговой растительности. При этом коэффициенты корреляции между NDVI и LST, EVI и LST для степной растительности низкие ($r = 0.221$ и $r = 0.153$).

Для луговой и степной растительности выявлено, что между вегетационными индексами, характеризующими биомассу (NDVI, EVI, LAI, NPP) и гидротермические условия (LSWI, FPAR), существуют высокие положительные корреляционные связи в пределах от $r = 0.588$ до $r = 0.954$.

Построены карты пространственного распределения индекса NDVI луговой и степной растительности на участках луг и степь по данным Landsat 8 за 29 июля. Выявлено, что индекс NDVI достоверно различается для луговой (NDVI = 0.5) и степной (NDVI = 0.2) растительности.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

“Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0287-2021-0018)”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Егоров В.А., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А.* Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьют. оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е.* Космический мониторинг импактных районов Арктики // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 4–24. DOI: 10.7868/S0205961415040028.
- Ботвич И.Ю., Волкова А.И., Кононова Н.А., Иванова Ю.Д., Шевырногов А.П.* Спектрометрирование травянистой растительности Красноярского края и республики Хакасия: методика измерений, хранение и обработка данных // XXI Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева “Решетневские чтения”, 18–22 ноября 2017 г. Красноярск. С. 398–400.
- 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 // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66.
- Зоркина Т.М.* Фитоценология: учебно-метод. пособие. Абакан: Изд-во Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова, 2003. 48 с.
- Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Шевырногов А.П.* Нелинейные тренды чистой первичной продукции растительности юга Красноярского края по спутниковым данным: методы и подходы // Фунд. исслед. 2015. № 3. С. 106–110.
- Музылев Е.Л., Старцева З.П., Зейлигер А.М., Ермолаева О.С., Волкова Е.В., Василенко Е.В., Осипов А.И.* Использование спутниковых данных о характеристиках подстилающей поверхности и метеорологических характеристиках при моделировании водного и теплового режимов большого сельскохозяйственного региона // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 44–60.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ик-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 85–90.
- Родионова А.В., Тебердиев Д.М.* Продуктивность долголетнего сеяного сенокоса и плодородие дерново-подзолистых почв // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. № 10. С. 178–183.
- Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С.* Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65.
- Соловьев В.И., Успенский С.А.* Мониторинг температуры поверхности суши по данным геостационарных метеорологических спутников нового поколения // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 3. С. 79–89.
- Черенкова Е.А.* Использование спутниковых данных для анализа изменения влажности почвы и состояния раститель-

ного покрова юга европейской России в конце XX – начале XXI века // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 80–87.

Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.

Шукилович А.Ю., Федотова Е.В., Маглинец Ю.А. Применение сенсора MODIS для оперативного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2016. 9(7). С. 1035–1044.

Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T. Ya. Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 39–43. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043.

Chandrasekar K, Sai M., Roy P.S., Dwevedi R.S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS

Vegetation Index product // International journal of remote sensing. 2010. V. 31(15). P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.

Justice C.O., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., Roy D.P., Ha D.K., Salomonson V.V., Privette J.L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R.B., Knyazikhin Y., Running S.W., Nemani R.R., Wan Z., Huete A.R., van Leeuwen W., Woife R.E., Giglio E., Muller J.P., Lewis P., Barnsley M.J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research // IEEE transact. Geosci. and rem. sens. 1998. Y. 36. No. 4. P. 1228–1249.

Rouse J. W, Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings, 3rd Earth Res. Techn. Satellite (ERTS) Symp. 1974. Y. 1. P. 48–62.

Xiao X., Boles S., Liu J., Zhuang D., Liu M. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data // Rem. Sens. Environm. 2002. V. 82. P. 335–348. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00051-2.

Informative Value of Spectral Vegetation Indices for the Meadow and Steppe Vegetation Monitoring of Khakassia by Ground and Satellite Data

A. P. Shevyrnogov¹, I. Yu. Botvich¹, T. I. Pisman¹, A. I. Volkova²,
N. A. Kononova¹, S. A. Ivanov¹

¹Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

²Katanov Khakass State University, Abakan, Russia

The article presents the results of the assessment of the possibility to identify meadow and steppe vegetation of Khakassia using ground and MODIS and LANDSAT 8 satellite data during the 2017 growing season. According to the results of field geobotanical studies, it was shown that the productivity of meadow vegetation exceeded the productivity of steppe vegetation. As a result of ground-based spectral measurements, it was shown that monitoring of the spectral reflectivity of meadow and steppe vegetation can be used to identify them. The analysis of MODIS satellite data (based on the NDVI, the enhanced vegetation index EVI, the land surface water index LSWI, the leaf area index LAI, the fraction of absorbed photosynthetically active radiation FPAR and net primary production NPP) revealed that the values of the studied indices for meadow vegetation significantly exceeded the values for steppe vegetation. The exception was the land surface temperature LST, which was higher for steppe vegetation than for meadow vegetation. High positive correlations between vegetation indices characterizing biomass (NDVI, EVI, LAI, NPP) and hydrothermal conditions (LSWI, FPAR) for meadow and steppe vegetation were determined. However, the correlation coefficients between NDVI and LST, EVI and LST for steppe vegetation were low. Based on the obtained maps of the spatial distribution of the NDVI index of meadow and steppe vegetation according to Landsat 8 data for July 29, it was shown that the NDVI index significantly differed for the studied vegetation types. For meadow vegetation, the NDVI value was significantly higher than for steppe vegetation.

Keywords: vegetation, satellite data, MODIS, LANDSAT 8, vegetation indices, ground-based spectrophotometry, geobotanical studies, meadow, steppe

REFERENCES

Bartalev S.A., Egorov V.A., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A. Raspoznavanie pahotnyh zemel' na osnove mnogoletnih sputnikovyh dannyh spektrometra MODIS i lokal'no-adaptivnoj klassifikatsii [Recognition of arable lands using multi-annual satellite data from spectroradiometer Modis and locally adaptive supervised classification] // Komp'yuternaya optika. 2011. V. 35. № 1. P. 103–116. (In Russian).

Bondur V.G., Vorobev V.E. Satellite Monitoring of Impact Arctic Regions // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015. Vol. 51. No. 9. P. 949–968. DOI: 10.1134/S0001433815090054.

Botvich I. Yu., Volkova A.I., Kononova N.A., Ivanova Yu.D., Shevyrnogov A.P. Spektrometrirovaniye travyanistoy rastitel'nosti Krasnoyarskogo kraya i respubliki Hakasiya: metodika izmerenij, hranenie i obrabotka dannyh [Spectrometry of herbaceous vegetation in the Krasnoyarsk Territory and

- the Republic of Khakassia: measurement technique, data storage and processing] // XXI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, posvyashchennaya pamyati general'nogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M. F. Reshetneva "Reshetnevskie chteniya", 18–22 noyabrya 2017 g. Krasnoyarsk. P. 398–400. (In Russian).
- Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G.* Vozmozhnosti distancionnoj ocenki sostoyaniya i stepeni degradacii prirodnyh kormovyh ugodij [Capabilities for rangelands state and degradation assessment using remote sensing data] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. V. 15. № 7. P. 53–66. (In Russian).
- Zorkina T.M.* Fitocenologiya: uchebno-metod. posobie. Abakan: Izd-vo Hakasskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. F. Katanova, 2003. 48 p. (In Russian)
- Lar'ko A.A., Ivanova Yu.D., Shevyrnogov A.P.* Nelinejnye trendy chistoj pervichnoj produkcii rastitel'nosti yuga Krasnoyarskogo kraja po sputnikovym dannym: metody i podhody [Non-linear trends of plants net primary production in south of Krasnoyarsk krai with satellite data: methods and approaches] // *Fundamental'nye issledovaniya* 2015. № 3. P. 106–110. (In Russian).
- Muzylev E.L., Starceva Z.P., Zejliger A.M., Ermolaeva O.S., Volkova E.V., Vasilenko E.V., Osipov A.I.* Ispol'zovanie sputnikovyh dannyh o harakteristikah podstilayushchej poverhnosti i meteorologicheskikh harakteristikah pri modelirovanii vodnogo i teplovogo rezhimov bol'shogo sel'skohozyajstvennogo regiona [The use of satellite data on land surface and meteorological characteristics in modeling the water and heat regimes of large agricultural region] // *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. V. 16. № 3. P. 44–60. (In Russian).
- Polyakov A.V., Timofeev YU. M., Uspenskij A. B.* Vozmozhnosti opredeleniya temperatury i izluchatel'noj sposobnosti poverhnosti sushi po dannym sputnikovyh ik-zondirovshchikov vysokogo spektral'nogo razresheniya (IKFS-2) [Possibilities for determining the temperature and emissivity of the land surface from the data of high spectral resolution satellite infrared sounders (IRFS-2)] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2010. № 4. P. 85–90. (In Russian).
- Rodionova A.V., Teberdiev D.M.* Produktivnost' dolgoletnego seyanogo senokosa i plodorodie dernovo-podzolistyh pochv [Productivity of long-term seeded hayfields and fertility of soddy-podzolic soils] // *Uspekhi sovremennoj nauki*. 2017. V. 1. № 10. P. 178–183. (In Russian).
- Savin I. Yu., Tanov E.R., Harzinov S.* Ispol'zovanie vegetacionnogo indeksa NDVI dlya ocenki kachestva pochv pashni (na primere Baksanskogo rajona Kabardino-Balkarii) [The use of NDVI profiles for estimating the quality of arable lands (exemplified by the Baksan region in Kabardino-Balkaria)] // *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2015. V. 77. P. 51–65. (In Russian).
- Solov'ev V.I., Uspenskij S.A.* Monitoring temperatury poverhnosti sushi po dannym geostacionarnyh meteorologicheskikh sputnikov novogo pokoleniya [Land surface temperature monitoring according to new generation geostationary meteorological satellites] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2009. № 3. P. 79–89. (In Russian).
- Cherenkova E.A.* Ispol'zovanie sputnikovyh dannyh dlya analiza izmeneniya vlazhnosti pochvy i sostoyaniya rastitel'nogo pokrova yuga evropejskoj Rossii v konce XX – nachale XXI veka [Using satellite data to analyze changes in soil moisture and the state of vegetation cover in the south of European Russia at the end of the 20th – beginning of the 21st century] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2011. № 6. P. 80–87. (In Russian).
- Cherepanov S.K.* Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nyh gosudarstv (v predelah byvshego SSSR). SPb.: Mir i sem'ya, 1995. 992 p. (In Russian).
- Shukilovich A. Yu., Fedotova E.V., Maglinec Yu.A.* Primenenie sensora MODIS dlya operativnogo monitoringa zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya [Using Modis data for agricultural areas monitoring] // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016. 9(7). P. 1035–1044. (In Russian).
- Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T. Ya.* Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 39–43. DOI: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043.
- Chandrasekar K, Sai M., Roy P.S., Dwevedi R. S.* Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product // *International journal of remote sensing*. 2010. V. 31(15). P. 3987–4005. DOI: 10.1080/01431160802575653.
- Justice C. O., Vermote E., Townshend J. R. G., Defries R., Roy D. P., Ha D. K., Salomonson V. V., Privette J. L., Riggs G., Strahler A., Lucht W., Myneni R. B., Knyazikhin Y., Running S. W., Nemani R. R., Wan Z., Huete A. R., van Leeuwen W., Woelfe R. E., Giglio E., Muller J. P., Lewis P., Barnsley M. J.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research // *IEEE transact. Geosci. and rem. sens*. 1998. V. 36. No. 4. P. 1228–1249.
- Rouse J. W., Haas R. H., Scheel J. A., Deering D. W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // *Proceedings, 3rd Earth Res. Techn. Satellite (ERTS) Symp*. 1974. V. 1. P. 48–62.
- Xiao X., Boles S., Liu J., Zhuang D., Liu M.* Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data // *Rem. Sens. Environm*. 2002. V. 82. P. 335–348. DOI:10.1016/S0034-4257(02)00051-2.