

Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий

Ф. В. Ерошенко¹, С. А. Барталев², Н. Г. Лапенко¹, Е. В. Самофал², И. Г. Сторчак¹

¹ Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр
Михайловск, Ставропольский край, 356241, Россия
E-mail: yer-sniish@mail.ru

² Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru

Целью работы стало установление связи между дистанционно измеряемыми спектрально отражательными характеристиками естественных кормовых угодий и показателями их состояния, получаемыми при наземных геоботанических обследованиях. Исследования проводились в Ставропольском крае на 16 тестовых участках, приуроченных к ландшафтам разнотравно-дерновиннозлаковых степей. По результатам наземных геоботанических обследований на основании Методических рекомендаций по выявлению деградированных и загрязнённых земель была дана оценка состояния каждого участка. Также для анализа были использованы данные сенсора MODIS (пространственное разрешение 230 м, ежедневная периодичность) и высокодетальные изображения сенсора MSI спутников Sentinel-2A/2B (пространственное разрешение 10 м, периодичность 2–5 дней). Была установлена тесная корреляция значений NDVI (сенсор MODIS) с показателем степени деградации. Рассчитанный коэффициент ранговой корреляции Спирмена составил $-0,67$ при учёте всех четырёх степеней деградации и $-0,89$ при объединении ненарушенной и слабodeградированной категорий. С помощью ручного сенсора GreenSeeker фирмы Trimble было установлено, что во время максимального развития травостоя значения вегетационного индекса NDVI основных видов растительности практически одинаковы. Поэтому сравнение пастбищных угодий по степени деградации с использованием данных дистанционного зондирования Земли следует проводить во время максимального развития травостоя. В этот период по каждому участку и для всей категории в целом был рассчитан интегральный средневзвешенный показатель NDVI (сенсор MSI), характеризующийся суммой произведений центрального значения NDVI столбца гистограммы на частоту. Далее была рассчитана разность между средневзвешенным NDVI категории и отдельного участка, применявшаяся в классификации. Если объединить ненарушенные и слабонарушенные степени деградации, то коэффициент ранговой корреляции с NDVI составляет $-0,95$ (против $-0,80$ в случае раздельной оценки всех четырёх степеней деградации). Таким образом, используя данные дистанционного зондирования Земли, можно с достаточно высокой степенью достоверности дать оценку состояния и степени деградации пастбищных угодий.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, кормовые угодья, степень деградации, вегетационный индекс NDVI

Одобрена к печати: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66

Введение

Являясь источником биологически ценных кормов из дикорастущих трав, природные кормовые угодья (пастбища и сенокосы) играют важнейшую роль в отечественном животноводстве (Кулинцев и др., 2013). Повышенная антропогенная нагрузка и меняющиеся климатические условия часто приводят к трансформации природных травостоев, в том числе к изменению их продуктивности и видового состава (Дзыбов, 2010). Организация устойчивого животноводства сопряжена с необходимостью постоянного контроля состояния естественных кормовых угодий. Для оценки состояния природных травостоев обычно проводят наземные геоботанические обследования (Общесоюзная..., 1984; Работнов, 1964), которые в силу своей трудоёмкости и больших размеров, требующих обследования территорий, не способны обеспечить регулярное получение информации с достаточно высоким уровнем точности.

Развитию возможностей использования методов дистанционного зондирования для мониторинга состояния природных кормовых угодий (прежде всего, пастбищ) посвящено значительное число научных исследований, проводимых с конца прошлого столетия (Барталев, 1991; Рачкулик, Ситникова, 1981). К настоящему времени распространение получили подходы к дистанционной оценке состояния пастбищ на основе использования нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Deering, 1978; Tucker, 1979). При этом часто предполагается, что значение NDVI определяется вкладом растительного покрова и почвы, выраженным линейной комбинацией значений спектральных коэффициентов яркости указанных двух компонентов, взятых с весами, пропорциональными относительной доле занимаемой ими площади в пикселе спутникового изображения (Gao et al., 2010; Meusburger et al., 2010). Анализируется пространственно-временная изменчивость распределения значений NDVI по территории пастбищ и их многолетняя динамика (Шинкаренко, 2015). Для выявления деградированных участков травостоя может использоваться метод разделения спектральных смесей, позволяющий оценивать проективное покрытие травяного покрова на основе определения вклада таких компонент, как растительность, оголённая почва и камни (De Asis et al., 2008; Lehnert et al., 2014).

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

Исходные данные и методы исследований

Исследования проводились на территории Ставропольского края на тестовых участках (рис. 1, см. с. 55), приуроченных к ландшафтам разнотравно-дерновиннозлаковых степей и относящихся по агроэкологическим и почвенным условиям к зерново-скотоводческой сельскохозяйственной зоне (Танфильев, 1973). Климатические условия зоны благоприятны для роста и развития основных видов растений пастбищных угодий: гидротермический коэффициент варьирует от 0,9 до 1,1, среднегодовое количество осадков составляет 450–550 мм. Сумма положительных температур за период активной вегетации достигает 3000–3400 °С. Территория зоны относится к Предкавказской почвенной провинции, почвенный покров которой представлен преимущественно почвами чернозёмного типа (Агроклиматические..., 1971; Кулинцев и др., 2013).

Геоботаническое обследование природных кормовых угодий проводилось на учётных площадках (станциях) размером 100 м² в условиях развитого травостоя, что способствовало наиболее полному выявлению флористического состава растительности (Гребенников и др., 2015; Доспехов, 1973; Лавренко, Корчагин, 1964; Работнов, 1964). Состояние природных угодий оценивали с использованием Методических рекомендаций по выявлению деградированных и загрязнённых земель (Методические..., 1995). Латинские названия растений приведены по С. К. Черепанову (1995).

Результаты экспедиционных обследований тестовых участков, представленные в табл. 1 и 2, позволили дать оценку состояния и пастбищной дигрессии природных кормовых угодий.

Категория 0 — *недеградированные (ненарушенные) кормовые угодья*, полностью сохранившие свою природно-хозяйственную значимость. В травостое доминируют многолетние злаки, включая такие, как келерия стройная (*Koeleria cristata*), ковыль красивейший (*Stipa pulcherrima*), кострец безостый (*Bromopsis inermis*), кострец береговой (*Bromopsis riparia*), овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*), овсяница скальная (*Festuca rupicola*). Из бобовых и разнотравья встречаются астрагал австрийский (*Astragalus austriacus*), астрагал эспарцетовидный (*Astragalus onobrychis*), вика тонколистная (*Vicia tenuifolia*), герань кроваво-красная (*Geranium*

sanguineum), клевер горный (*Amoria montana*), лабазник обыкновенный (*Filipendula vulgaris*), люцерна румынская (*Medicago romanica*), подмаренник русский (*Galium ruthenicum*), чабрец Маршалла (*Thymus marschallianus*), черноголовник многобрачный (*Poterium polygamum*), эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria*) и др.

Категория I — слабодеградированные кормовые угодья, растительный покров которых испытывает слабое влияние выпаса или сенокосения. В травостое преобладают многолетние злаки: бородач кровоостанавливающий (*Bothriochloa ischaetum*), житняк гребенчатый (*Agropyron pectinatum*), келерия стройная (*Koeleria cristata*), кострец безостый (*Bromopsis inermis*), кострец береговой (*Bromopsis riparia*), овсяница валлиская (*Festuca valesiaca*). Им сопутствуют с небольшим обилием виды бобовых, такие как астрагал австрийский (*Astragalus austriacus*), вика узколистная (*Vicia angustifolia*), вязель пёстрый (*Securigera varia*), люцерна румынская (*Medicago romanica*), и разнотравье: василёк восточный (*Centaurea orientalis*), гвоздика Рупрехта (*Dianthus ruprechtii*), подмаренник русский (*Galium ruthenicum*), резак обыкновенный (*Falcaria vulgaris*), чистец чашечный (*Stachys atherocalyx*) и некоторые другие.

Категория II — среднедеградированные кормовые угодья, растительный покров которых испытывает умеренное влияние выпаса или сенокосения. В деградированном травостое обилие целинных видов, таких как келерия стройная (*Koeleria cristata*), костёр береговой (*Bromopsis riparia*), люцерна румынская (*Medicago romanica*), сокращается. Происходит замена в травостое до 20–25 % ценных кормовых трав низкопродуктивным разнотравьем. Появляются пастбищные сорняки, в том числе малолетние: василёк раскидистый (*Centaurea diffusa*), костёр японский (*Bromus japonicus*), эгилопс цилиндрический (*Aegylops cylindrica*).

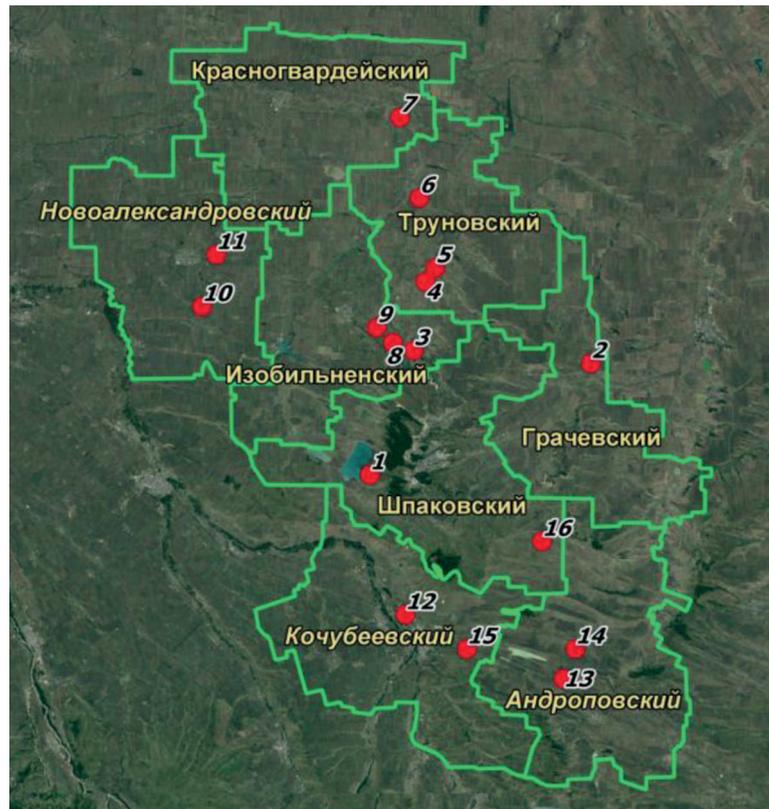


Рис. 1. Расположение тестовых участков: 1 — Сенгилеевское, Шпаковский район; 2 — Ямки, Грачевский район; 3 — Московское, Изобильненский район; 4 — Донское, Труновский район; 5 — Труновка, Труновский район; 6 — Безопасное, Труновский район; 7 — Дмитриевское, Красногвардейский район; 8 — Старая дорога, Изобильненский район; 9 — Найденовка, Изобильненский район; 10 — Кармалиновское, Новоалександровский район; 11 — Виноградное, Новоалександровский район; 12 — Невинномысск, Кочубеевский район; 13 — Водораздел, Андроповский район; 14 — Кианкиз, Андроповский район; 15 — Екатерининская, Кочубеевский район; 16 — Нижний Бешпагир, Шпаковский район

Таблица 1. Флоро-ценологические показатели травяных сообществ тестовых участков

№ п/п	Пункты, административные районы	Число видов	Флористические группы, %			Жизненные циклы, %			Сорняки, %
			Злаки	Бобовые	Разно травье	Однолетние	Двулетние	Многолетние	
1	Сенгилеевское, Шпаковский район	45	13,3	13,3	73,4	4,4	2,2	93,4	6,7
2	Ямки, Грачевский район	27	25,9	14,8	59,3	7,4	7,4	85,2	18,5
3	Московское, Изобильненский район	28	14,3	14,3	71,4	10,7	10,7	78,6	21,4
4	Донское, Труновский район	36	30,6	13,9	55,5	11,1	5,6	83,3	22,2
5	Труновка, Труновский район	29	24,1	10,3	65,6	10,3	3,4	86,3	10,3
6	Безопасное, Труновский район	23	13,0	17,4	69,6	26,1	13,0	60,9	30,4
7	Дмитриевское, Красногвардейский район	17	17,6	5,9	76,5	41,2	0,0	58,8	35,3
8	Старая дорога, Изобильненский район	34	14,8	8,8	76,4	11,8	2,9	85,3	14,7
9	Найденовка, Изобильненский район	33	21,2	12,1	66,7	3,0	3,0	94,0	6,1
10	Кармалиновское, Новоалександровского района	26	15,4	15,4	69,2	7,7	3,8	88,5	26,9
11	Виноградное, Новоалександровского района	25	16,0	12,0	72,0	8,0	0,0	92,0	16,0
12	Невинномыск, Кочубеевский район	10	20,0	10,0	70,0	0,0	0,0	100,0	0,0
13	Водораздел, Андроповский район	11	27,3	9,1	63,6	18,2	0,0	81,8	9,1
14	Кианкиз, Андроповский район	25	28,0	16,0	56,0	32,0	8,0	60,0	16,0
15	Екатериновская, Кочубеевский район	23	13,0	4,3	82,7	4,3	4,3	91,4	21,7
16	Нижний Бешпагир, Шпаковский район	41	12,2	12,2	75,6	0,0	2,4	97,6	4,9

Таблица 2. Особенности степных сообществ исследованных участков

№ п/п	Пункты, административные районы	Проективное покрытие, %	Тип или модификация растительности	Степень деградации
1	Сенгилеевское, Шпаковский район	100	ковыльно-типчаково-разнотравная	0
2	Ямки, Грачевский район	90	бородачево-типчаково-разнотравная	II
3	Московское, Изобильненский район	80	типчаково-тысячелистниково-разнотравная	II
4	Донское, Труновский район	90	бородачево-разнотравная	II
5	Труновка, Труновский район	70	бородачево-типчаково-разнотравная	I
6	Безопасное, Труновский район	70	попынно-разнотравная	III
7	Дмитриевское, Красногвардейский район	70	попынно-разнотравная	III
8	Старая дорога, Изобильненский район	100	ковыльно-черно-головниково-разнотравная	0
9	Найденовка, Изобильненский район	100	бородачево-люцерново-разнотравная	I
10	Кармалиновское, Новоалександровский район	100	пырейно-разнотравная	II
11	Виноградное, Новоалександровский район	100	бородачево-келериево-разнотравная	II
12	Невинномысск, Кочубеевский район	100	люцерново-типчаково-разнотравная	0
13	Водораздел, Андроповский район	70	типчаково-разнотравная	II
14	Кианкиз, Андроповский район	80	типчаково-пырейно-однолетниковая	III
15	Екатериновская, Кочубеевский район	100	типчаково-люцерново-разнотравная	0
16	Нижний Бешпагир, Шпаковский район	100	типчаково-кострецово-разнотравная	I

Категория III — *сильнодеградированные кормовые угодья*, растительный покров которых испытывает сильное влияние выпаса или сенокосения. Растительный покров характеризуется практически отсутствием ценных кормовых злаковых и бобовых видов, большим обилием однолетних сорняков. В результате чрезмерной пастбищной нагрузки в течение ряда лет произошла замена до 25–75 % ценных кормовых трав низкопродуктивным и сорным разнотравьем. Особенность этих угодий состоит в том, что из травостоев выпали ценные в кормовом отношении виды: житняк гребенчатый (*Agropyron pectinatum*), келерия стройная (*Koeleria cristata*), виды ковылей (*Stipa*), костреца (*Bromopsis*). Они сменились сорными растениями: васильком раскидистым (*Centaurea diffusa*), зопником клубненосным (*Phlomodides tuberosa*), костром японским (*Bromus japonicus*), люцерной маленькой (*Medicago minima*), шалфеем эфиопским (*Salvia aethiops*) и др.

Методы оценки состояния и степени деградации кормовых угодий по данным ДЗЗ

Рост степени деградации кормовых угодий сопряжён со снижением проективного покрытия растительного покрова и повышением в его составе доли сорных растений, имеющих, как правило, более низкую продуктивность. Это позволяет предположить, что существует корреляция степени деградации кормовых угодий с индексом NDVI и другими спектрально-отражательными характеристиками, несущими информацию о зелёной биомассе/площади ассимиляционной поверхности растений и содержании в них хлорофилла. Такое предположение базируется на следующих положениях:

1. Для характеристики степени развития растений может быть использован вегетационный индекс NDVI, зависящий от биомассы, площади ассимиляционной поверхности, содержания хлорофилла в растениях и т.д. (Ерошенко и др., 2016).
2. Степень деградации пастбища определяется в том числе долей площади участка с плохо развитой или полностью отсутствующей растительностью (Методические..., 1995).
3. Плохие условия роста и развития на деградированной части угодья ухудшают общее состояние растений, а также ведут к доминированию видов с плохо развитой биомассой (Методические..., 1995), и, как правило, NDVI этой части пастбища существенно ниже, чем не деградированной.

Для анализа использовались данные сенсора MODIS (пространственное разрешение 230 м, ежедневная периодичность). Также были применены высокодетальные изображения сенсора MSI спутников Sentinel-2A/2B (пространственное разрешение 10 м, периодичность 2–5 дней). Предварительная обработка данных вышеперечисленных систем включала в себя следующие этапы:

- радиометрическая коррекция;
- атмосферная коррекция;
- фильтрация облачности.

С помощью этих данных для тестовых полигонов были получены:

- значения коэффициентов спектральной яркости в красном и ближнем инфракрасном каналах;
- временные ряды вегетационного индекса NDVI;
- средневзвешенный NDVI.

Совместный анализ данных ДЗЗ и результатов геоботанических обследований состоял в том, чтобы выявить ранговую корреляцию между степенью деградации пастбища и вышеперечисленными характеристиками. Для этого, наряду с визуальной оценкой делимости кормовых угодий с различной степенью деградации по кривым NDVI/коэффициентам спектральной яркости, был применён анализ гистограмм NDVI, полученных в период максимума развития растительности. Интегральный средневзвешенный NDVI стал основой для классификации участков по степени деградации.

Для изучения влияния различных видов растений, доминирующих на исследованных полигонах (разнотравье, злаки и бобовые), на значение вегетационного индекса NDVI использовали ручной сенсор GreenSeeker фирмы Trimble (Железова и др., 2013).

Результаты исследований

На первом этапе был проведён сравнительный анализ данных геоботанических обследований с временными рядами индекса NDVI (рис. 2, см. с. 59), а также с коэффициентами спектральной яркости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (рис. 3, см. 59), полученных со сканера MODIS. Ввиду того, что размеры некоторых тестовых полигонов не позволяют использовать в анализе достаточное количество пикселей, были изучены участки № 1, 2, 12, 14, 16 (их суммарная площадь составляет 96 % от общей площади всех участков). На качественном уровне временные ряды значений NDVI демонстрируют высокое ранговое соответствие степени деградации исследуемых участков пастбищ.

Стоит отметить, что максимальное значение NDVI слабodeградированного участка (№ 16) несколько выше, чем у ненарушенных участков. Средне- и сильнодеградированные пастбища хорошо различимы как между собой, так и среди представленных тестовых полигонов. Рассчитанный коэффициент ранговой корреляции Спирмена составляет:

- $-0,67$ при учёте всех четырёх степеней деградации;
- $-0,89$ при объединении ненарушенной и слабodeградированной категорий.

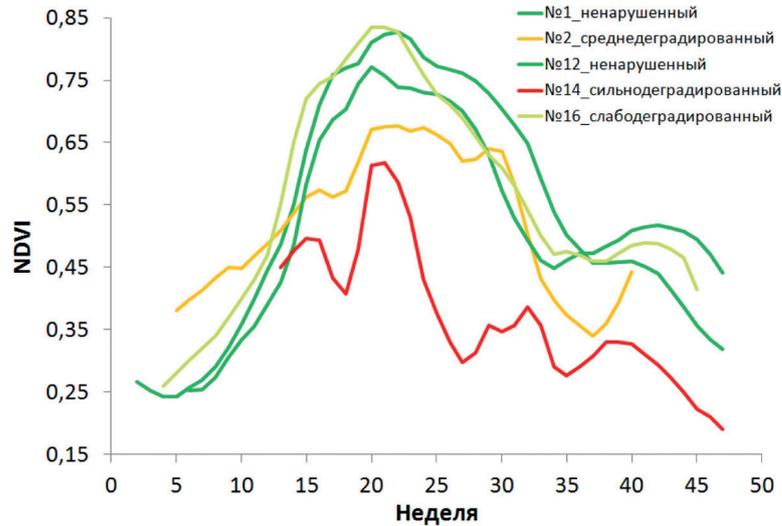


Рис. 2. Временные ряды NDVI некоторых тестовых участков пастбищ различной степени деградации

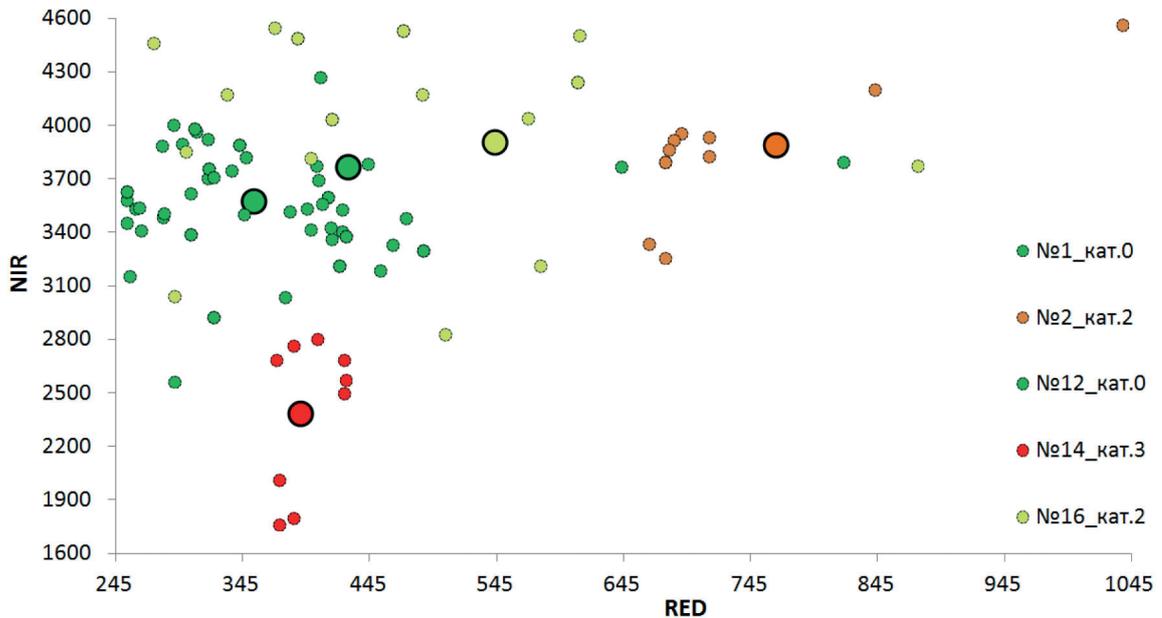


Рис. 3. КСЯ в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах некоторых тестовых участков

Низкие значения КСЯ как в видимом, так и в ближнем ИК-диапазонах (см. рис. 3) позволяют уверенно отделять сильнодеградированное пастбище от остальных. Высокие значения КСЯ в видимом и в ближнем ИК-диапазонах характеризуют среднедеградированный участок. Средние по полигону значения КСЯ для ненарушенных участков располагаются достаточно близко и характеризуются малой величиной в видимом, большой величиной в ближнем ИК-диапазонах. Обращает на себя внимание факт, что участок № 16 имеет наибольший разброс значений КСЯ, плотнее всего пересекаясь с ненарушенными пастбищами, тогда как № 14 наиболее компактен в пространстве признаков.

Вторым этапом сравнения данных ДЗЗ и геоботанических материалов стал анализ значений NDVI, полученных как в полевых условиях, так и по спутниковым данным высокого разрешения Sentinel-2A/2B. Картограммы распределения NDVI по территории различных полигонов представлены на рис. 4 (см. с. 60).

В течение роста и развития растений картина распределения индекса NDVI по территории полигона может существенно меняться (рис. 5, см. с. 60).

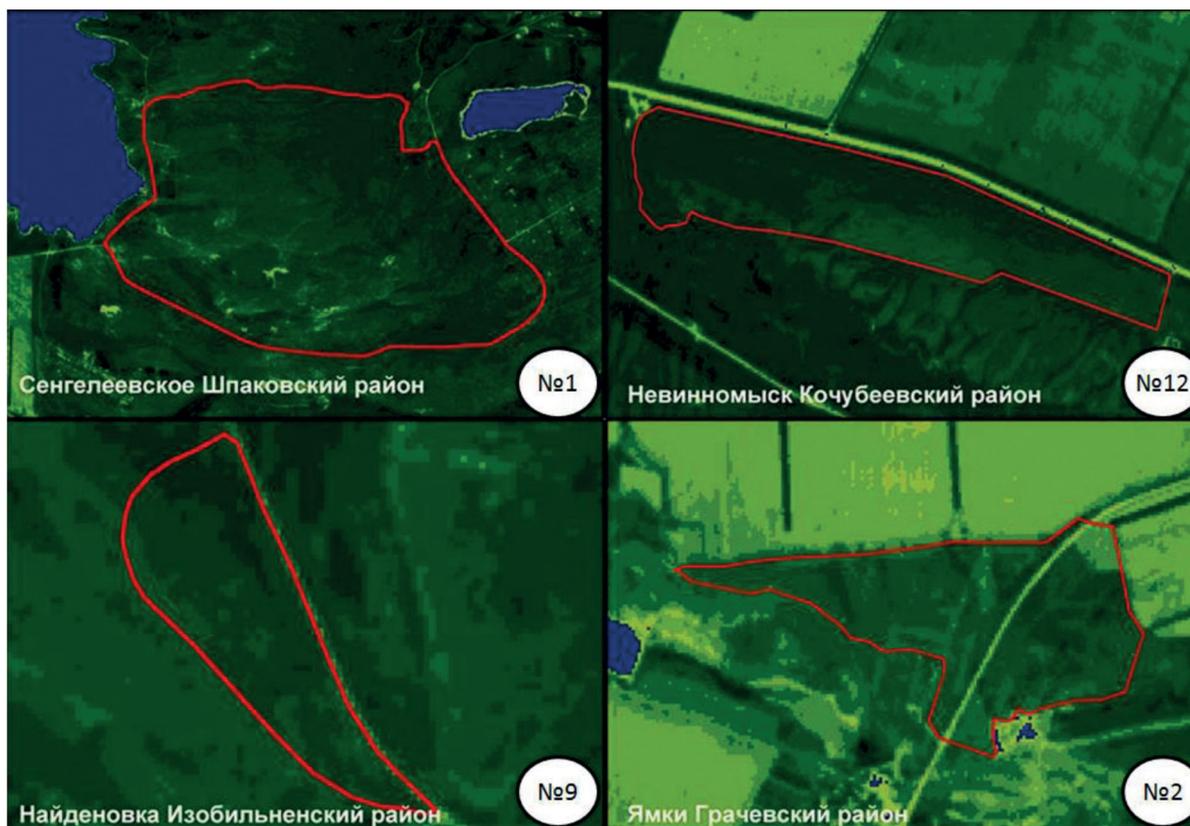


Рис. 4. Картограммы распределения вегетационного индекса NDVI по данным Sentinel-2 для территории полигона; 2 июля 2017 г.

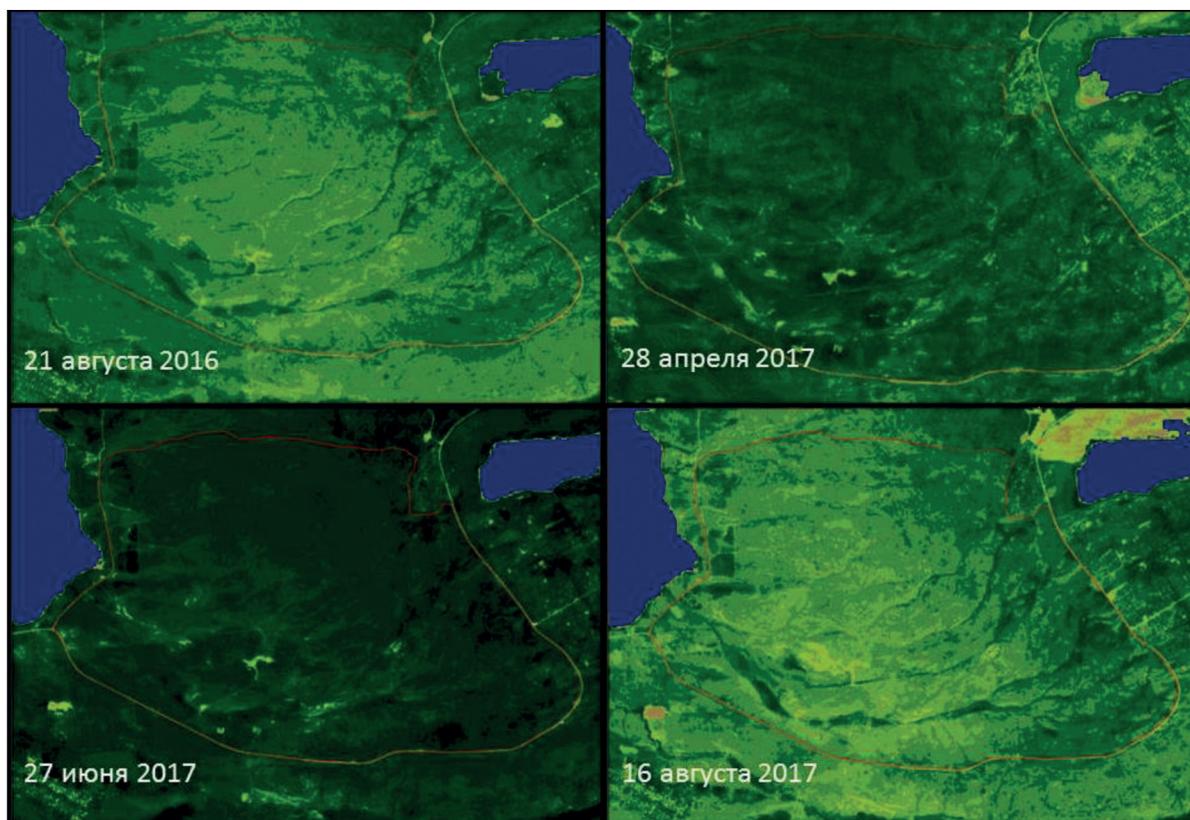


Рис. 5. Влияние даты наблюдения на распределение значений NDVI по данным Sentinel-2 для Сенгилеевского полигона Шпаковского района (№ 1)

Основные виды растений, доминирующие на исследованных полигонах (злаки, бобовые, разнотравье), различаются по архитектонике и характеризуются определёнными темпами развития. Следовательно, величина NDVI различных видов растительности полигона в разные даты будет неодинакова. Также будет различным и их вклад в общий для полигона NDVI, в том числе по датам наблюдений. Это подтверждается проведёнными исследованиями по изучению динамики NDVI различных видов растительности на одном полигоне (№ 1, Сенгилеевское Шпаковского района) с помощью прибора GreenSeeker (табл. 3).

Таблица 3. NDVI различных видов растительности полигона Сенгилеевское Шпаковского района. Данные ручного сканера GreenSeeker

Дата	Бобовые	Злаки	Разнотравье
29 мая 2017 г.	0,61	0,68	0,59
29 июня 2017 г.	0,69	0,71	0,71
27 июля 2017 г.	0,63	0,52	0,61
31 августа 2017 г.	0,52	0,30	0,47

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что во время максимального развития травостоя, который в 2017 г. наступил в конце июня, величина NDVI основных видов растительности практически одинакова. Следовательно, в этот период видовые особенности не оказывают существенного влияния на общее значение вегетационного индекса. Поэтому *сравнение пастбищных угодий по степени деградации с использованием данных дистанционного зондирования Земли следует проводить в период максимального развития травостоя.*

Для анализа степени деградации по каждому участку и для всей категории в целом был рассчитан интегральный средневзвешенный показатель NDVI, характеризующийся суммой произведений центрального значения NDVI столбца гистограммы (рис. 6) на частоту. Далее была рассчитана разность между средневзвешенным NDVI категории и отдельного участка, применявшаяся в классификации (табл. 4).

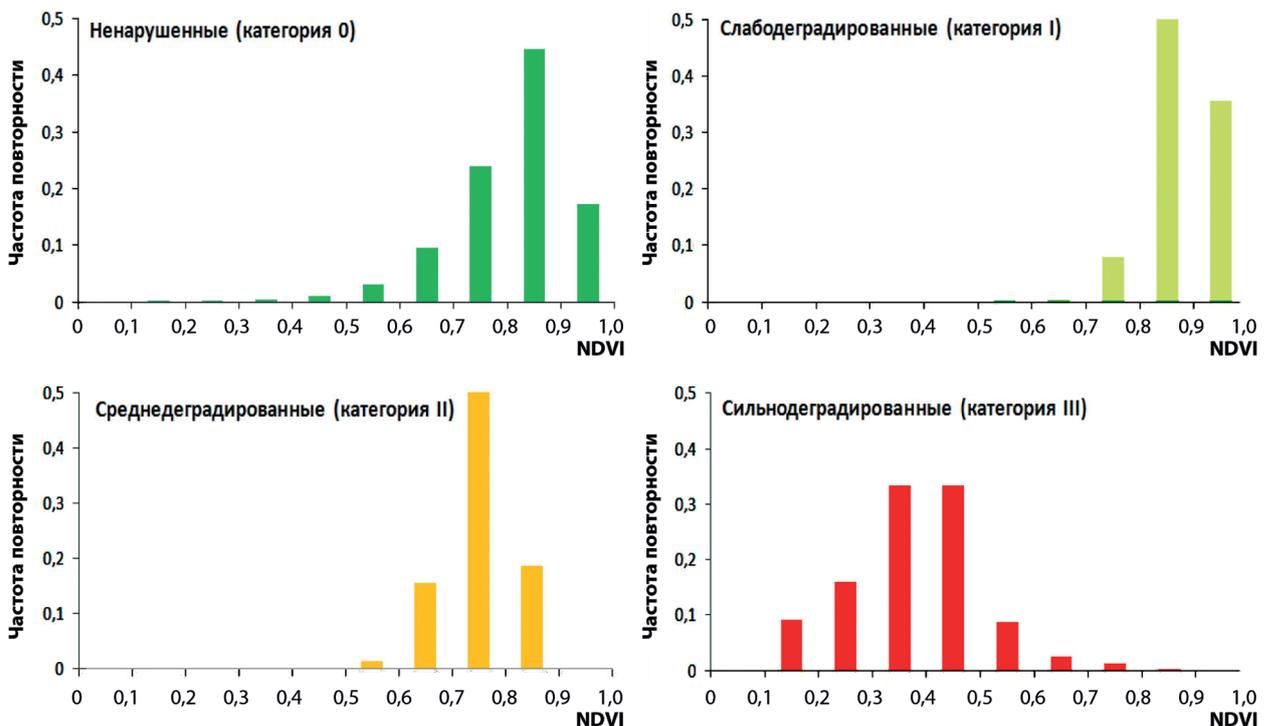


Рис. 6. Гистограммы NDVI (Sentinel-2) для участков пастбищ различных категорий деградации

Таблица 4. Точность распознавания полей по категориям деградации растительности

	Категория 0	Категория I	Категория II	Категория III	Пропуски, %
Категория 0	4	0	0	0	0,00
Категория I	1	2	0	0	0,33
Категория II	0	2	2	2	0,67
Категория III	1	0	0	2	0,33
Ошибочные включения, %	0,33	0,50	0,00	0,50	0,63

Таблица 5. Точность распознавания полей по категориям деградации растительности при объединении ненарушенных (0) и слабодegradированных (I) категорий

	Категория I	Категория II	Категория III	Пропуски, %
Категория I	7	0	0	0,00
Категория II	2	2	2	0,67
Категория III	1	0	2	0,33
Ошибочные включения, %	0,30	0,00	0,50	0,69

Стоит отметить, что значения NDVI слабодegradированных пастбищ компактно расположены в области 0,70–1,00, в то время как ненарушенные имеют более выраженное смещение в область низких значений. Это может быть связано с тем, что общая площадь участков ненарушенной категории в 10 раз больше площади слабодegradированных участков (из-за разнородного полигона № 1, Сенгелевское). Ввиду вышесказанного можно сделать вывод, что целесообразно объединить ненарушенные (0) и слабонарушенные (I) степени — в этом случае коэффициент ранговой корреляции составляет $-0,95$ (против $-0,80$ в случае раздельной оценки всех четырёх степеней деградации). При объединении категорий ненарушенных (0) и слабодegradированных (I) пастбищ точность повышается на 6 %. (табл. 5). Категории II, III также хорошо различаются по гистограммам, как и по NDVI/КСЯ (MODIS).

Выводы

1. Оценка природных кормовых угодий показала, что естественные травостои по запасам кормов и их качеству неоднородны и находятся на разной стадии пастбищной дигрессии. Это обусловлено природно-хозяйственной спецификой и местоположением территории, характеризующейся различными показателями: климатом, рельефом, почвенным покровом, гидрологией, антропогенным воздействием и др.
2. Наземная оценка состояния и степени деградации пастбищ — очень трудоёмкая работа, которая в отдельных случаях даёт не вполне корректные результаты, связанные с субъективностью получаемых данных.
3. Используя данные дистанционного зондирования Земли можно с достаточно высокой степенью достоверности дать объективную оценку состояния и степени деградации пастбищных угодий.

Временные ряды значений индекса NDVI для выбранных полигонов получены по данным спектрорадиометра MODIS со спутника Terra с пространственным разрешением 230 м с использованием сервиса Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>) (Лупян и др., 2011).

Обработка данных ДЗЗ при проведении исследований выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН (Лупян и др., 2015).

Литература

1. Агроклиматические ресурсы Ставропольского края. Л.: Гидрометиздат, 1971. 273 с.
2. *Барталев С. А.* Автоматизированные методы обработки аэрокосмической информации при оценке состояния пастбищных угодий пустынь: автореф. ... канд. тех. наук. М., 1991. 23 с.
3. *Гребенников В. Г., Шипилов И. А., Желтопузов В. Н., Хонина О. В., Турун И. П.* Практические рекомендации по оценке, рациональному использованию естественных кормовых угодий с разработкой технологии их улучшения в различных природно-климатических зонах Ставропольского края. Ставрополь, 2015. 97 с.
4. *Дзыбов Д. С.* Агростепи. Ставрополь: АГРУС, 2010. 256 с.
5. *Доспехов Б. А.* Методика полевого опыта. М., 1973. 336 с.
6. *Ерошенко Ф. В., Барталев С. А., Сторчак И. Г., Плотников Д. Е.* Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112.
7. *Железова С. В., Березовский Е. В., Аброськин Д. П.* Использование прибора GreenSeeker® RT200 для мониторинга посевов озимой пшеницы при разных технологиях возделывания // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 1. С. 56–60.
8. *Кулинцев В. В., Годунова Е. И., Желнакова Л. И., Удовыдченко В. И., Петрова Л. Н., Антонов С. А., Андреев Д. Ю., Черкашин В. Н., Дридигер В. К., Дзыбов Д. С., Крайцов В. В., Ерошенко Ф. В., Куприченко М. Т., Ковтун В. И., Багринцева В. Н., Кузыченко Ю. А., Шустикова Е. П., Хрипунов А. И., Шаповалова Н. Н., Чертов В. Г., Володин А. Б., Комаров Н. М., Лапенко Н. Г., Галушко Н. А., Давыдяц Э. С., Чапцев А. Н., Чапцева Т. В., Шлыкова Т. Д., Браткова Л. Г., Чумакова В. В., Ерошенко А. А., Ходжаева Н. А., Федотов А. А.* Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2013. 520 с.
9. *Лавренко Е. М., Корчагин А. А.* Полевая геоботаника. М.-Л., 1964. Т. 3. 530 с.
10. *Лулян Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности (ВЕГА) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
11. *Лулян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
12. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель. Роскомзем. Письмо № 3-15/582 от 27.03.1995. 23 с.
13. Общесоюзная инструкция по проведению геоботанических исследований природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт. М.: Колос, 1984. 105 с.
14. *Работнов Т. А.* К методике наблюдения над травянистыми растениями на постоянных площадках // Ботанический журн. 1964. Т. 36. № 6. С. 47–50.
15. *Рачкулик В. И., Ситникова М. В.* Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 287 с.
16. *Танфильев В. В.* Растительность Ставропольского края // Естественные науки. 1973. № 3. С. 38–42.
17. *Черепанов С. К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
18. *Шинкаренко С. С.* Анализ динамики пастбищных ландшафтов в аридных условиях на основе нормализованного вегетационного индекса (NDVI) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2015. № 1(37). С. 110–114.
19. *De Asis A. M., Omasa K., Oki K., Shimizu Y.* Accuracy and applicability of linear spectral unmixing in delineating potential erosion areas in tropical watersheds // Intern. J. Remote Sensing. 2008. No. 29(14). pp. 4151–4171.
20. *Deering D. W.* Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. Ph. D. Diss. Texas A&M University, College Station. 1978. 338 p.
21. *Gao Q. Z., Wan Y. F., Xu H. M., Li Y., Jiangcun W. Z., Borjigidai A.* Alpine grass-land degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet. China // Quaternary Intern. 2010. V. 226(1–2). P. 143–150.

22. *Lehnert L. W., Meyer H., Meyer N., Reudenbach Ch., Bendix J.* A hyperspectral indicator system for rangeland degradation on the Tibetan Plateau: A case study towards spaceborne monitoring // *Ecological Indicators*. 2014. V. 39. P. 54–64.
23. *Meusbürger K., Banninger D., Alewell C.* Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. V. 12. P. 201–207.
24. *Tucker C. J.* Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8(2). P. 127–150.

Capabilities for rangelands state and degradation assessment using remote sensing data

F. V. Eroshenko¹, S. A. Bartalev², N. G. Lapenko¹, E. V. Samofal², I. G. Storchak¹

¹ *North Caucasus Federal Agricultural Research Center
Mikhailovsk, Stavropol Region 356241, Russia
E-mail: yer-sniish@mail.ru*

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru*

The study aimed to investigate the relationships between remotely measured spectral characteristics and rangelands condition indicators acquired through ground-based geobotanical survey. The study was carried out in the Stavropol Region on 16 test sites located in the mixed grass steppes landscape. The MODIS (230 m) and Sentinel-2 (10 m) satellite instruments data were used for the study. A strong correlation between MODIS-derived NDVI and a rangelands degradation index values was established. The Spearman rank correlation coefficient of -0.67 was estimated for four different degrees of rangelands degradation and it grew up to -0.89 by combining two lowest rangelands degradation categories. Using the ground-based measurements by the GreenSeeker sensor it was found that the NDVI values of main grass species were quasi equal at the vegetation maximum development stage. It justifies the herbaceous cover development peak as most appropriate time interval for rangelands degradation assessment with remote sensing data. The weighted NDVI mean values derived from Sentinel-2 data demonstrated an increase in the rank correlation with rangelands degradation up to -0.80 and -0.95 in cases of four and three different categories of vegetation disturbances respectively.

Keywords: remote sensing, rangelands degradation assessment, vegetation index, NDVI

Accepted: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66

References

1. *Agroklimaticheskie resursy Stavropol'skogo kraya* (Agroclimatic resources of the Stavropol Territory), Leningrad: Gidrometizdat, 1971, 273 p.
2. Bartalev S. A., *Avtomatizirovannyye metody obrabotki aerokosmicheskoy informatsii pri otsenke sostoyaniya pastbishchnykh ugodii pustyn': avtoref. ... kand. tekhn. nauk* (Automated methods for processing aerospace information in assessing the condition of pasture lands of deserts: Extended abstract Cand. techn. sci. thesis), Moscow, 1991, 23 p.
3. Grebennikov V. G., Shipilov I. A., Zheltopuzov V. N., Khonina O. V., Turun I. P., *Prakticheskie rekomendatsii po otsenke, ratsional'nomu ispol'zovaniyu estestvennykh kormovykh ugodii s razrabotkoi tekhnologii ikh uluchsheniya v razlichnykh prirodno-klimaticheskikh zonakh Stavropol'skogo kraya* (Practical recommendations on assessment, rational use of natural forage lands with the development of technology for their improvement in various natural and climatic zones of the Stavropol Territory), Stavropol, 2015, 97 p.

4. Dzybov D. S., *Agrostepi* (Agrostepi), Stavropol: AGRUS, 2010, 256 p.
5. Dospekhov B. A., *Metodika polevogo opyta* (Methodology of field experience), Moscow, 1973, 336 p.
6. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Storchak I. G., Plotnikov D. E., *Vozmozhnosti distantsionnoi otsenki urozhainosti ozimoi pshenitsy na osnove vegetatsionnogo indeksa fotosinteticheskogo potentsiala* (Possibilities of remote evaluation of the yield of winter wheat on the basis of vegetative index of photosynthetic potential), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 99–112.
7. Zhelezova S. V., Berezovskii E. V., Abroskin D. P., *Ispol'zovanie pribora GreenSeeker® RT200 dlya monitoringa posevov ozimoi pshenitsy pri raznykh tekhnologiyakh vzdelyvaniya* (Use of GreenSeeker® RT200 for monitoring winter wheat crops under different cultivation technologies), *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2013, No. 1, pp. 56–60.
8. Kulintsev V. V., Godunova E. I., Zhelnakova L. I., Udovydchenko V. I., Petrova L. N., Antonov S. A., Andreyanov D. Ju., Cherkashin V. N., Dridiger V. K., Dzybov D. S., Kravtsov V. V., Eroshenko F. V., Kuprichenkov M. T., Kovtun V. I., Bagrintseva V. N., Kuzychenko Yu. A., Shustikova E. P., Khripunov A. I., Shapovalova N. N., Chertov V. G., Volodin A. B., Komarov N. M., Lapenko N. G., Galushko N. A., Davidyants Je. S., Chaptsev A. N., Chaptseva T. V., Shlykova T. D., Bratkova L. G., Chumakova V. V., Eroshenko A. A., Khodzhaeva N. A., Fedotov A. A., *Sistema zemledeliya novogo pokoleniya Stavropol'skogo kraya* (The system of agriculture of the new generation of the Stavropol Territory), Stavropol': AGRUS, 2013, 520 p.
9. Lavrenko E. M., Korchagina A. A., *Polevaya geobotanika* (Field geobotany), Moscow-Leningrad, 1964, Vol. 3, 530 p.
10. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E., *Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti (VEGA) (Contemporary problems of remote sensing of the Earth from space)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
11. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., *Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovyykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy* (Center for collective use of the systems of archiving, processing and analysis of satellite data of the IKI RAS for solving problems of studying and monitoring the environment), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
12. *Metodicheskie rekomendatsii po vyyavleniyu degradirovannykh i zagryaznennykh zemel* (Methodical recommendations for the identification of degraded and contaminated land) Committee of the Russian Federation for Land Resources and Land Management, Letter 3-15/582 of 27.03.1995, 23 p.
13. *Obshchесоюзная инструкция по проведению геоботанических исследований природных кормовых угодий и составлению крупномасштабных геоботанических карт* (All-Union instruction for conducting geobotanical studies of natural fodder lands and compiling large-scale geobotanical maps), Moscow: Kolos, 1984, 105 p.
14. Rabotnov T. A., *K metodike nablyudeniya nad travyanistymi rasteniyami na postoyannykh ploshchadkakh* (To the technique of observation of herbaceous plants on permanent sites), *Botanicheskii zhurnal*, 1964, Vol. 36, No. 6, pp. 47–50.
15. Rachkulik V. I., Sitnikova M. V., *Otrazhatel'nye svoystva i sostoyanie rastitel'nogo pokrova* (Reflective properties and the state of vegetation cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 287 p.
16. Tanfiliev V. V., *Rastitel'nost' Stavropol'skogo kraya* (Vegetation of the Stavropol Territory), *Estestvennyye nauki*, 1973, No. 3, pp. 38–42.
17. Cherepanov S. K., *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* (Vascular plants of Russia and the adjacent States (within the former USSR)), Saint Petersburg: Mir i sem'ya, 1995, 992 p.
18. Shinkarenko S. S., *Analiz dinamiki pastbishchnykh landshaftov v aridnykh usloviyakh na osnove normalizovannogo vegetatsionnogo indeksa (NDVI) (Analysis of the dynamics of pasture landscapes in arid conditions based on the normalized vegetative index (NDVI))*, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*, No. 1(37), 2015, pp. 110–114.
19. De Asis A. M., Omasa K., Oki K., Shimizu Y., *Accuracy and applicability of linear spectral unmixing in delineating potential erosion areas in tropical watersheds*, *Intern. J. Remote Sensing*, 2008, No. 29(14), pp. 4151–4171.
20. Deering D. W., *Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors*, Ph.D. Diss., Texas A&M Universini, College Station, 1978, 338 p.

21. Gao Q.Z., Wan Y.F., Xu H.M., Li Y., Jiangcun W.Z., Borjigidai A., Alpine grass-land degradation index and its response to recent climate variability in Northern Tibet, China, *Quaternary Intern.*, 2010, No. 226(1–2), pp. 143–150.
22. Lehnert L.W., Meyer H., Meyer N., Reudenbach Ch., Bendix J., A hyperspectral indicator system for rangeland degradation on the Tibetan Plateau: A case study towards spaceborne monitoring, *Ecological Indicators*, 2014, No. 39, pp. 54–64.
23. Meusbürger K., Banninger D., Alewell C., Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, No. 12, pp. 201–207.
24. Tucker C.J., Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, No. 8(2), pp. 127–150.