

О ПРИМЕНЕНИИ NDVI ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СТЕПНЫХ И ПУСТЫННЫХ ЭКОСИСТЕМ ГОБИ¹

© 2019 г. П.Д. Гунин*, В.П. Дедков**, Е.В. Данжалова*, С.Н. Бажа*, А.Н. Золотокрылин***, Т.И. Казанцева****

*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: topexp@mail.ru

**Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта
Россия, 236036, г. Калининград, ул. А. Невского, д. 14. E-mail: VDedkov@kantiana.ru

***Институт географии РАН
Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29. E-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru

****Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН
Россия, 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 2. E-mail: bulgancum@gmail.com

Поступила в редакцию 25.12.2018. После доработки 25.12.2018. Принята к публикации 10.01.2019.

Исследовано современное состояние сухостепных, пустынно-степных, горностепных и пустынных экосистем Гоби в Монголии. В сухих степях и остепненных пустынях было выявлено не только снижение фитоценологических показателей растительных сообществ и ухудшение состояния доминантов, но и изменение их состава. Так, произошла замена типичных злаковых видов сухих степей (*Stipa krylovii*, *Agropyron cristatum* и др.) на пустынно-степные виды (*Allium polyrrhizum*). В остепненных пустынях отмечено значительное снижение роли травяных видов (*Stipa glareosa*, *Cleistogenes songorica*) в структуре сообщества и увеличение доли пустынных полукустарничков (*Anabasis brevifolia*, *Salsola passerina*). Растительность настоящих и крайнеаридных пустынь оказалась наиболее устойчивой к аридизации и росту пастбищных нагрузок. Здесь выявлены изменения только в симпегмовом сообществе, где отмечено значительное снижение численности *Sympegma regelii*.

Было выявлено несоответствие между значениями индекса NDVI, полученными дистанционно со снимков Landsat 8, и фитоценологическими показателями, определенными при полевых исследованиях. Данные полевой спектрометрии видов-доминантов, поверхности почв и растительных сообществ показали, что почвенный фон играет значительную роль в формировании спектральных образов растительных сообществ, особенно при низком проективном покрытии.

Ключевые слова: сухие степи, пустынные степи, горные степи, остепненные пустыни, настоящие пустыни, крайнеаридные пустыни, Гоби, NDVI, полевая спектрометрия.

DOI: 10.24411/1993-3916-2019-10064

Пустынные степи и пустыни Гоби, растительность которых формировалась в экстремальных природных условиях, характеризуются обедненным видовым составом и разреженностью. В последние десятилетия жесткость условий стала усугубляться интенсивным развитием пастбищного животноводства. Так, чрезмерные пастбищные нагрузки, наряду с длительными засухами, являются основными причинами инвазии и расширения ареалов типичных пустынно-степных видов *Ephedra sinica*² и *Allium polyrrhizum* в подзоне сухих дерновиннозлаковых степей Центральной Монголии (Бажа и др., 2015). Таким образом, возникла необходимость продолжать комплексные исследования сухих и пустынных степей и пустынь Монголии, начатые сотрудниками Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции (СРМКБЭ) Российской

¹ Работа выполнена в рамках Программы научных исследований и при финансовой поддержке Совместной российско-монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и Академии наук Монголии.

² Латинские названия растений приведены по работе И.А. Губанова (1996).

академии наук и Академии наук Монголии еще в 1970-х гг. (Пустынные степи ..., 1981; Пустыни ..., 1987; Казанцева, 2009).

Одним из современных направлений исследований растительного покрова является применение дистанционных методов при помощи различных вегетационных индексов, основанных, как правило, на сканировании больших площадей со спутника или самолета. Для исследуемого региона также активно используется информация дистанционного зондирования (ДЗ) для мониторинга и оценки состояния экосистем (Гунин и др., 2004; Харин, Татейши, 2004; Karnieli et al., 2013). В частности, для рассматриваемых степных и пустынных экосистем предложены индикаторы увлажнения территории, «островов» антропогенного опустынивания, степени перевыпаса аридных пастбищ, разработанные на основе спутниковых данных MODIS (Золотокрылин и др., 2016).

В связи с этим целью работы является оценка современного состояния растительности сухих и пустынных степей и пустынь Гоби на ключевых участках по данным полевых геоботанических наблюдений и с применением вегетационного индекса NDVI. Ранее мы высказывали предположение, что при низком проективном покрытии растений в пустынях высокая отражательная способность почв вносит некоторую неопределенность (Гунин и др., 2004). В связи с этим была проведена полевая съемка спектрометрического состава отраженной радиации у видов-доминантов, подстилающей поверхности почв и интегральных спектров растительных сообществ.

Материалы и методы

Полевые наблюдения были проведены в конце лета 2013 г. на территории сомонов Дэлгэр-Цогт Среднегобийского аймака, Гурван-Тэс и Булган Южногобийского аймака и Шинэ-Джинст Баян-Хонгорского аймака в рамках Научной программы СРМКБЭ (табл.). Оценка состояния экосистем осуществлялась на основе фитоценологических показателей сообществ, данных о видовом составе, роли видов в структуре сообществ, их жизненного состояния, габитуса, наличия видов-индикаторов пастбищной дигрессии. Полученные данные сравнивались с показателями состояния экосистем в 1970-90-е гг. (Карта растительности МНР, 1979; Кормоботаническая ..., 1981; Казанцева, 2009).

Для получения значений индекса NDVI были подобраны снимки со спутника Landsat 8, максимально приближенные к датам полевых исследований. Пространственное разрешение снимков составляет 30 м. Расчет значений индекса NDVI проводился в геоинформационной системе QGIS 3.4.3. на основе данных 4 канала с диапазоном 630-680 нм (красный) и 5 канала с диапазоном 845-885 нм (ближний инфракрасный диапазон, далее БИК).

Одновременно с геоботаническими исследованиями в этих же растительных сообществах были проведены работы по измерению спектрального коэффициента отраженной радиации (ОР) доминантных видов и поверхности почвы при помощи ручного полевого спектрометра FieldSpec UV/VNIR в диапазоне 325-1075 нм. Точность измерения составляла 1.0 нм, угол обзора – 1°. Кроме того, были получены интегральные спектры ОР растительных сообществ на участках 30×30 м, совпадающие с размером пикселя на космических снимках Landsat 8. Съемка на таких площадях осуществлялась путем прохождения по ним по методу «конверта». В центре этих площадок определяли географические координаты. Измерения проводились между 10 и 14 часами, чаще всего при высоте Солнца более 45°, при открытом диске Солнца. Перед каждым включением прибора проводили калибровку баланса белого. Значение индекса NDVI по данным полевого спектрометра рассчитывали в тех же диапазонах, что и для снимков Landsat 8.

Результаты и обсуждение

Состояние растительности. Исследования, проведенные в 2009 г., показали значительную деградацию степных экосистем в Среднегобийском аймаке (Гунин и др., 2010). Наиболее негативная ситуация возникла в сомоне Дэлгэр-Цогт, где в настоящее время на значительной площади уже сформировались луковые сообщества с доминированием пустынно-степного вида – лука многокорневого (*Allium polyrrhizum*), ранее не отмечаемого в зональных сообществах сухих степей. Изученные сообщества характеризуются низкими фитоценологическими показателями. Даже в благоприятном по увлажнению 2013 г. в луковом с караганой сообществе (МГ-Х) проективное покрытие (п.п.) не превышало 18%, а надземная фитомасса (н.ф.) достигала 4.6 кг/га, в структуре которой *Allium polyrrhizum* составил более 70%. Злаки встречались единично.

Таблица. Вегетационный индекс NDVI в степных и пустынных экосистемах Гоби по данным полевой съемки и дистанционного зондирования.

Дата полевой съемки	Дата съемки Landsat 8	Подзона	Индекс участка	Географические координаты (высота, м н.у.м. БС)	Растительное сообщество	NDVI		Проектное покрытие, %
						Field-Spec	Landsat 8	
21.08.13	24.08.13	Сухие степи	МГ-Х	46° 08' 32.0" с.ш., 106° 30' 46.9" в.д. (1363)	Луковое с караганой	0.20	0.21	18
21.08.13	24.08.13	Сухие степи (интразональное сообщество)	ДЦ-3	46° 10' 42.0" с.ш., 106° 31' 38.7" в.д. (1315)	Луково-реомюриево-воробьино-солянковое	0.20	0.15	40
24.08.13	22.08.13	Пустынные степи	Ц-2	44° 00' 43.1" с.ш., 103° 33' 34.8" в.д. (1434)	Луково-ковыльковое	0.23	0.07	13-15
24.08.13	22.08.13		Ц-1	44° 00' 41.8" с.ш., 103° 33' 35.1" в.д. (1432)	Вьюнково-ковыльковое с однолетником	0.02	0.06	6-10
25.08.13	22.08.13	Остепненные пустыни	Ц-3	44° 13' 12.2" с.ш., 103° 31' 14.2" в.д. (1131)	Селитрянково-парнолистниково-карагановое	0.29	0.06	22
25.08.13	22.08.13		К-12	44° 14' 21.2" с.ш., 103° 31' 05.3" в.д. (1081)	Брахантемово-воробьино-солянковое	0.12	0.06	20
3.09.13	05.08.13		Участок 6	44° 15' 29.8" с.ш., 99° 21' 34.6" в.д., (1253)	Баглууровое	0.20	0.05	15
28.08.13	29.08.13	Горные степи	ГТ-1	43° 11.909' с.ш., 100° 42.438' в.д. (2093)	Эфедровое	0.16	0.06	10-15
31.08.13	05.08.13	Участки в оазисе Эхийн-Гол	19	43° 14' 26.5" с.ш., 98° 59' 23.2" в.д. (996)	Реомюриево с саксаулом, тамариксом и тополями	0.26	0.08	10
1.09.13	05.08.13		19-2	43° 14' 52.1" с.ш., 99° 00' 16.9" в.д. (972)	Осоковое	0.43	0.32	60
2.09.13	05.08.13	Настоящие пустыни	Участок 3	43° 55' 06.5" с.ш., 99° 11' 44.2" в.д. (1254)	Реомюриево-селитрянковое	0.29	0.07	5-6
2.09.13	05.08.13		Участок 4	43° 57' 23.0" с.ш., 99° 13' 41.8" в.д. (1264)	Саксауловое	0.02	0.05	2
3.09.13	05.08.13		Участок 5	44° 02' 37.3" с.ш., 99° 20' 45.4" в.д. (1432)	Симпегмовое	0.07	0.06	2
29.08.13	05.08.13	Крайне аридные пустыни	Участок 1	43° 11' 08.1" с.ш., 98° 55' 56.0" в.д. (1108)	Эфедрово-саксауловое	0.11	0.03	2-3

Более высокие фитоценотические показатели (40% и 15.7 кг/га) отмечались в интразональном луково-реомюриево-воробьиносолянковом сообществе (ДЦ-3) в солонцевато-солончаковом понижении в 4 км на ССВ от участка МГ-Х. Подобные интразональные сообщества являются

рефугиумами, из которых происходит распространение лука многокорневого в зональные сухостепные сообщества (Бажа и др., 2015).

В сомоне Булган растительность характеризуется вертикальными сменами в силу увеличения высоты территории с севера на юг. Так, на севере сомона представлены остепненные пустыни, сменяющиеся по мере продвижения на юг пустынными, опустыненными и горными сухими степями. В 2013 г. отмечено плохое состояние змеевково-ковыльково-баглуриновых сообществ, которые широко распространены на защебненных эрозионно-денудационных равнинах в полосе остепненных пустынь. Здесь доля злаков *Cleistogenes songorica* и *Stipa glareosa* в структуре надземной фитомассы составила менее 1%, тогда как в предыдущие годы наблюдений была не ниже 12%. Более 90% фитомассы сообщества сформировано полукустарничком *Anabasis brevifolia*, более 9% – *Salsola passerina*. На подгорной равнине, у границы с пустынными степями в лучшем состоянии находились селитрянково-парнолистниково-карагановое (Ц-3) и брахантемово-воробьиносолянковое (К-12) сообщества, где проективное покрытие в 2013 г. достигало 22%, а в 1972-2003 гг. не превышало 15% (Казанцева, 2009). В пустынных степях в целом отмечено хорошее состояние у *Stipa gobica*, доминанта широко распространенных здесь луково-ковыльковых сообществ. Однако вблизи центра сомона состояние пастбищ было очень плохое (Ц-1). Здесь в 2013 г. отмечены низкие фитоценотические показатели – 10% (п.п.) и 2.3 кг/га (н.ф.). Более половины всей надземной массы сформировано однолетником *Neopallasia pectinata*. Сильно объедена *Stipa gobica*. Внутри огороженного от выпаса участка в луково-ковыльковом сообществе (Ц-2) фитоценотические показатели увеличивались в 1.5 раза по сравнению с пастбищем.

Эфедровое (ГТ-1) горностепное сообщество было исследовано в нижней части конуса выноса в горной системе Тост-Ула в сомоне Гурван-Тэс (табл.). Проективное покрытие здесь составило 10-15%, надземная фитомасса – 5.5 кг/га. Почти 90% фитомассы было сформировано вечнозеленым кустарничком *Ephedra sinica*. Из других видов отмечались *Ajanía fruticulosa*, с незначительным обилием *Stipa glareosa* и *Allium polyrrhizum*.

Основные типы пустынь были изучены на профиле Шинэ-Джинст - Эхийн-Гол, протянувшимся от остепненных пустынь на подгорных равнинах гор Шинэ-Джинст на севере, до крайнеаридных на юге. Остепненные пустыни на профиле представлены баглуриновыми сообществами (участок 6). Проективное покрытие здесь варьировало в 1970-90-х гг. в зависимости от условий увлажнения от 1.6 до 7.6%. В среднем за эти годы проективное покрытие доминантов составило: *Anabasis brevifolia* – 2.5%, *Allium polyrrhizum* – 0.3%, *Stipa glareosa* – 0.4% (Казанцева, 2009). В 2013 г. проективное покрытие у баглур и лука многокорневого осталось без изменения, однако численность вегетирующих особей снизилась в 2 и 2.6 раза соответственно. Отмечена значительная часть мертвых экземпляров баглур. Заметно снизилась роль *Stipa glareosa* в сообществе. Большая часть ее дерновин находилась в состоянии покоя.

В настоящих пустынях были изучены симпегмовые сообщества (участок 5). Отмечено значительное (в 75 раз) снижение численности *Sympegma regelii*, а *Reaumuria songarica* целиком выпала из видового состава. Разреженные саксауловые сообщества (участок 4) оказались более устойчивыми. Проективное покрытие *Haloxylon ammodendron* практически не изменилось по сравнению с 1970-80-ми гг. и составило 0.5%, его численность даже возросла в 1.2 раза (92 экз./га). Хорошее состояние отмечено для реомюриево-селитрянкового сообщества (участок 3). Численность *Nitraria sibirica* увеличилась здесь почти в 2 раза, *Salsola arbuscula* – почти в 4, *Reaumuria songarica* – в 1.5 по сравнению 1984 г., а сухими являлись не более 3% экземпляров этих кустарников.

В крайнеаридных пустынях было изучено эфедрово-саксауловое сообщество (участок 1). Численность вегетирующего саксаула *Haloxylon ammodendron* за 29 лет возросла более чем в 2 раза, количество сухих экземпляров практически не изменилось. В то же время в 4 раза снизилась численность *Ephedra przewalskii*.

Вегетационный индекс NDVI и отраженная радиация почвенно-растительного покрова. Полевые геоботанические исследования степных и пустынных сообществ показали довольно низкие значения общего проективного покрытия и надземной фитомассы даже в лучшие по условиям увлажнения годы. Как следствие, в исследованных сообществах по данным ДЗ NDVI составил 0.03-0.21. Наибольшее его значение получено для сухостепного зонального сообщества (МГ-Х), но в интразональном сообществе с доминированием пустынных полукустарничков и более высокими фитоценотическими показателями вегетационный индекс ниже (ДЦ-3; табл.). В пустынных степях

NDVI составил 0.06 в деградированном сообществе (Ц-1) и незначительно увеличивался в сообществе при заповедании (Ц-2) с большим проективным покрытием и фитомассой. Похожим значением вегетационного индекса обладают сообщества остепненной пустыни в сомоне Булган (Ц-3, К-12) и эфедровое горностепное сообщество (ГТ-1). В остепненных и настоящих пустынях сомона Шинэ-Джинст значения NDVI составили 0.05-0.07, причем эти вариации не отражают разницу в величине проективного покрытия растительности. Наименьшее значение вегетационного индекса (0.03) зафиксировано в крайнеаридной пустыне (участок 1). Высоким значением NDVI выделяется растительное сообщество в оазисе Эхийн-Гол с густым покровом из осочки (19-2). На южной окраине оазиса в реомюриевом сообществе с саксаулом и тамариксами (19) NDVI составил 0.08 (табл.). Таким образом, значения NDVI, полученные со спутника Landsat 8 для растительных сообществ степей и пустынь Гоби, плохо коррелировали с фитоценотическими показателями сообществ, определенных нами в ходе полевого обследования.

Вычисленные по данным полевого спектрометра значения NDVI составляют 0.02-0.43 и отличаются от полученных по данным ДЗ, что и ожидалось – в силу разных методик и технических характеристик аппаратуры. Эти различия непропорциональны и носят разнонаправленный характер. Однако полевая спектрометрическая съемка позволяет скорректировать значения NDVI растительного сообщества с учетом особенностей ОР на видовом уровне растений-доминантов и характера подстилающей поверхности в том или ином сообществе.

Как известно, в видимом и БИК диапазонах на оптические свойства растений влияют фенофаза, архитектура растения, морфоанатомическая структура, структура растительного покрова; на свойства почв – содержание влаги, гумуса, окиси железа, механический состав, характеристики шероховатости поверхности. Кроме того, воздействие оказывают такие внешние факторы, как угол сканирования, азимут Солнца, высота Солнца над горизонтом, метеорологические факторы и т.д. (Дейвис и др., 1983; Выгодская, Горшкова, 1987).

В видимом диапазоне длин волн у растений пигменты листа являются доминирующим фактором. Анализ состава спектров ОР видов-доминантов показал, что в видимом диапазоне пик приходится на желто-оранжевую зону (576-613 нм), где коэффициент отражения достигает 0.09-0.31, что говорит о высоком содержании каротиноидов и антоцианов, которые образуются в период созревания плодов у травянистых растений, что также соответствует фенофазе данных видов и временному периоду полевых исследований (рис. 1, 2). С другой стороны, в кривых отражения почв в видимом диапазоне максимум (0.25-0.53) приходится также на желто-оранжевую зону, что объясняется палевым, коричневатым оттенком поверхности каштановых, бурых, палево-бурых, серо-бурых почв с вкраплениями сизого цвета щебенки на ее поверхности. В нашем случае можно предположить, что при съемке из-за морфологических особенностей строения видов-ксерофитов невозможно было навести линзу спектрометра именно на зеленую часть даже при угле обзора в 1° так, чтобы прибор не охватывал одревесневшие части у кустарников и поверхность почвы.

В БИК диапазоне на отражательную способность влияет внутренняя структура тканей листьев растений, плотность зеленых побегов, облиственность кроны. В БИК диапазоне ход кривой ОР у исследованных доминантов был разнонаправлен. У находящихся в хорошем жизненном состоянии *Allium polyrrhizum*, *Scorzonera divaricata*, *Zygophyllum xanthoxylon*, *Haloxylon ammodendron*, *Sympegma regelii* коэффициент отражения в БИК зоне увеличивался. У *Stipa gobica*, *Ephedra sinica*, *Haloxylon ammodendron*, находящихся в состоянии стресса, с подсыхающими побегами, отражение в БИК зоне снижалось, что можно объяснить слабой облиственностью, малой плотностью побегов и кроны. Ход кривой ОР поверхности почвы в БИК диапазоне так же, как и у растений, был разнонаправлен по отношению к видимой части спектра. Увеличение отражения в БИК зоне отмечено только у каштановых супесчаных сухостепных (МГ-Х) и у бурых пустынно-степных почв (Ц-2; рис. 1, 2).

Влияние физиологических и морфометрических характеристик растений в той или иной мере проявляется в характере отражения растительного покрова. Но поскольку в зональных сухостепных, пустынно-степных и пустынных экосистемах величина проективного покрытия, как правило, ниже 22%, то вклад почвенного фона в формирование спектрального образа фитоценоза может быть существенен. С одной стороны, он может формировать различия у одного и того же растительного сообщества, с другой стороны, может нивелировать контрасты между разными растительными сообществами.

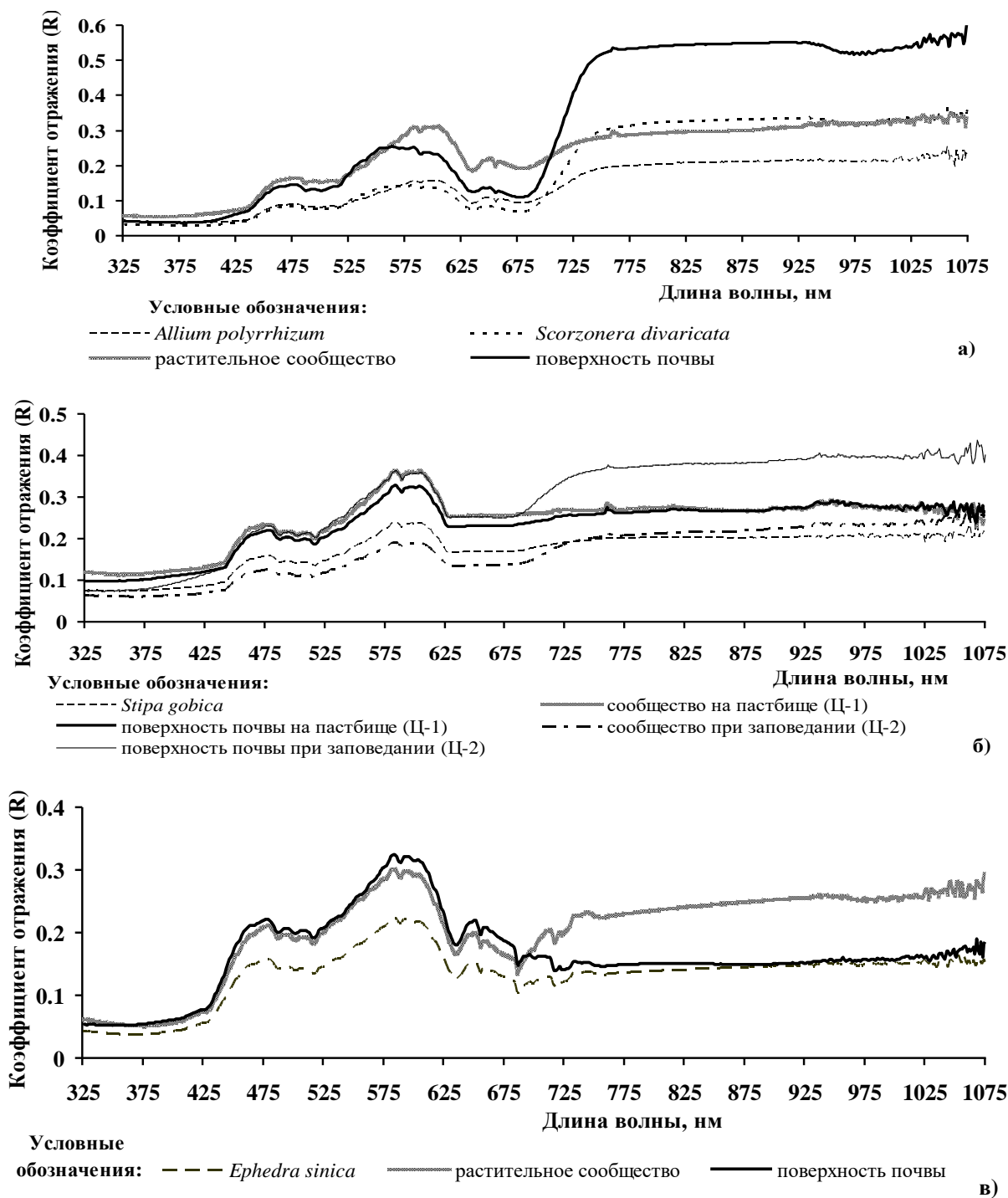


Рис. 1. Спектры ОР в степных сообществах: в луковом с караганой сообществе (МГ-Х) сухой степи (а), в луково-ковыльковом (Ц-2) и выюнково-ковыльковом с однолетником (Ц-1) сообществах пустынной степи (б), в эфедровом сообществе (ГТ-1) горной степи (в).

В исследованных сообществах значения их отражения могли занимать как среднее положение между значениями ОР видов-доминантов и почв, так и быть ниже или выше. На границе видимого и БИК диапазона положение спектральных кривых отражения менялось также по-разному. Для более детального анализа влияния почвенного фона на спектральные характеристики растительного сообщества как элемента ландшафта необходимо проведение более тщательных исследований с большей повторностью и привлечением большего числа характеристик как самих почв, так и структуры растительных сообществ и распределения видов-доминантов по площади, их габитуса.

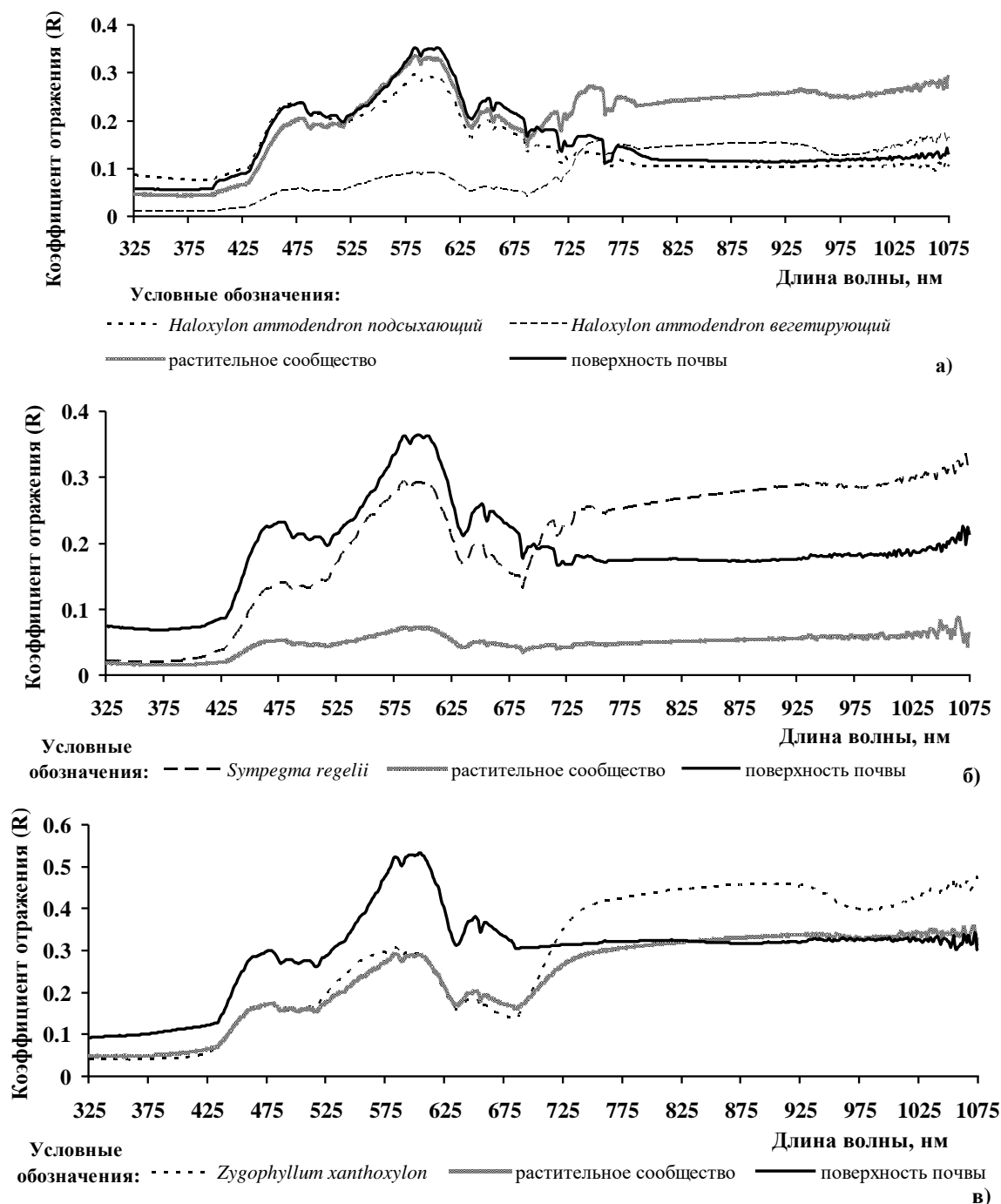


Рис. 2. Спектры ОР в сообществах пустынь: в эфедрово-саксауловом сообществе (участок 1) крайнеаридной пустыни (а), в парнолистниково-симпегмовом сообществе (участок 5) настоящей пустыни (б), в селитрянково-парнолистниково-карагановом сообществе (Ц-3) остепненной пустыни (в).

Заключение

Анализ наземных наблюдений на модельных полигонах в сухих степях (сомон Дэлгэр-Цогт) и остепненных пустынях (сомон Булган) показал четкую тенденцию не только к резкому снижению фитоценологических показателей, но и к изменению состава доминантов и субдоминантов сообществ. Если в первом случае была зарегистрирована замена типичных злаковых видов сухих степей (*Stipa krylovii*, *Agropyron cristatum*, *Cleistogenes squarrosa*, *Koeleria cristata*) на пустынно-степные виды (*Allium polyrrhizum*), то во втором отмечено значительное снижение роли травяных видов (*Stipa*

glareosa, *Cleistogenes songorica*) в структуре сообщества и увеличение доли пустынных полукустарничков (*Anabasis brevifolia*, *Salsola passerina*).

Что касается экосистем в Заалтайской Гоби, то изменения в сообществах пустынь носят неоднозначный характер. Так, в остепненных пустынях отмечено ухудшение жизненного состояния травяных видов (*Stipa glareosa*, *Allium polyrrhizum*), а также снижение их роли в сообществе. Растительность настоящих и крайнеаридных пустынь оказалась наиболее устойчивой к аридизации. Изменения здесь выявлены только в симпегмовом сообществе, где отмечено значительное снижение численности *Sympegma regelii*.

Значения индекса NDVI, полученные как со спутниковых данных, так и с помощью полевого спектрометра, не всегда соответствуют фитоценологическим показателям растительных сообществ. При низком проективном покрытии существенную роль в формировании спектральных образов растительных сообществ играет почвенный фон. Применение индекса NDVI, полученных дистанционно, для регионов с разреженной растительностью из-за искажения влияния подстилающей поверхности может использоваться весьма ограниченно без применения полевой коррекции данных. Это также подтверждается рядом исследований, проведенных в других регионах мира (Asner, 2004; Lange, 2004; Xiao, Moody, 2005; Wagenseil, Samimi, 2006). Таким образом, при оценке состояния гобийских экосистем на небольших площадях и выделения контуров для построения ландшафтных крупномасштабных карт опираться на этот показатель без привлечения более широкого набора данных наземных полевых исследований затруднительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бажа С.Н., Гунин П.Д., Данжалова Е.В., Дробышев Ю.И., Казанцева Т.И., Ариунболд Э., Мягмарсүрэн Д., Хадбаатар С., Цэрэнханд Г. 2015. Инвазийные сукцессии как индикатор опустынивания сухих степей на примере Центральной Монголии // Российский журнал биологических инвазий. № 3. С. 2-20.
- Выгодская Н.В., Горшкова И.И. 1987. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Л.: Гидрометиздат. 248 с.
- Губанов И.А. 1996. Конспект флоры Внешней Монголии (сосудистые растения). М.: Валанг. 136 с.
- Гунин П.Д., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Бажа С.Н. 2004. Динамика состояния растительного покрова Южной Монголии по данным NDVI // Аридные экосистемы. Т. 10. № 24-25. С. 29-34.
- Гунин П.Д., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Цэрэнханд Г., Дробышев Ю.И., Ариунболд Э. 2010. Современная структура и динамика растительных сообществ на южной границе сухих степей Центральной Монголии // Аридные экосистемы. Т. 16. № 2. С. 65-75.
- Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л., Свейн Ф.Х., Хоффер Р.М., Ланденлауб Д.С., Сиева Р.Ф. 1983. Дистанционное зондирование: количественный подход. М.: Недра. 415 с.
- Золотокрылин А.Н., Гунин П.Д., Титкова Т.Б., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Казанцева Т.И. 2016. Диагностика динамики опустынивания аридных пастбищ Монголии по наблюдениям на ключевых участках и MODIS-данным // Аридные экосистемы. Т. 22. № 3 (68). С. 9-19.
- Казанцева Т.И. 2009. Продуктивность зональных растительных сообществ степей и пустынь Гобийской части Монголии. М.: Наука. 336 с.
- Карта растительности МНР. 1979. М 1:1500000 / Ред. Е.М. Лавренко М.: ГУГК. 4 л.
- Кормоботаническая карта МНР. 1981. М 1:1000000. М.: ГУГК. 1 л.
- Пустыни Заалтайской Гоби: Природные условия, экосистемы и районирование. 1987. М.: Наука. 207 с.
- Пустынные степи и северные пустыни МНР. 1981. Ч. 2. Стационарные исследования. Л.: Наука. 260 с.
- Харин Н.Г., Татейшии Р. 2004. Карта деградации засушливых земель Азии // Аридные экосистемы. Т. 10. № 24-25. С. 17-28.
- Asner G.P. 2004. Biophysical Remote Sensing Signatures of Arid and Semiarid Ecosystems // Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring (Manual of Remote Sensing. 3rd ed. Vol. 4. P. 53-109.
- Lange N. 2006. Geoinformatik in Theorie und Praxis. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 454 p.
- Karnieli A., Bayarjargal Y., Bayasgalan M., Mandakh B., Dugarjav Ch., Burgheimer J., Khudulmur S., Bazha S.N., Gumin P.D. 2013. Do vegetation indices provide a reliable indication of vegetation degradation? A case study in Mongolian pastures // International Journal of Remote Sensing. Vol. 34. № 17. P. 6243-6262.
- Wagenseil H., Samimi C. 2006. Assessing spatial-temporal variations in plant phenology using Fourier analysis in NDVI time series: results from a dry savannah environment in Namibia // International Journal of Remote Sensing. No. 27 (16). P. 3455-3471.
- Xiao J., Moody A. 2005. A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA // Remote Sensing of Environment. No. 98 (2-3). P. 237-250.