

УДК 630\*5: 528.8

## УЧЕТ УРОЖАЙНОСТИ ПУСТЫННО-ПАСТБИЩНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

О.М. БЕД АРЕВА\*, В.К. ХЛЮСТОВ.

(Кафедра лесоводства)

Изложены дистанционные методы определения надземной фитомассы пастбищных угодий на основании ее взаимосвязи со спектральными коэффициентами яркости. Полученные регрессии показали взаимосвязь урожайности пастбищ, представленных различными видами растений в разные сроки вегетации, со спектральным коэффициентом яркости.

*Ключевые слова:* урожайность пастбищ, фотометрический метод, коэффициент яркости, жизненные формы ассоциации, доминанты ассоциаций, саксаул, терескен, биюргун, полынь, джужгун, астрагал малопарный, курчавка, кейреук, солянки.

Учет продуктивности естественных кормовых угодий связан с методически правильным решением таких вопросов, как выбор участка, количество выделенных учетных делянок, их размер, репрезентативность самого участка, техника учета урожайности и представляет одну из сложных задач в пастбищном хозяйстве.

Традиционный укосный метод получил широкое распространение на геоботанических стационарах и при маршрутных обследованиях. Несмотря на то, что этот метод широко используется повсеместно, ему присущ субъективизм, вызывающий систематические ошибки. В последние годы предложен метод определения урожайности пастбищ, основанный на коррелятивных взаимосвязях массы растений с их параметрами (высотой, диаметром кустов и др.). Этот биометрический метод исключает трудоемкие процессы скашивания, сушки, взвешивания укосов, однако также не лишен недостатков, особенно при учете фитомассы кустарниковой и полукустарниковой растительности. Обусловлено это тем, что кустарниковая раститель-

ность мало изменяется в различные годы по своему габитусу. Поэтому высокая урожайность в благоприятные годы связана не столько с объемом куста, сколько с его облиственностью, что существенно сказывается на величине всей надземной фитомассы.

### Методика

В настоящее время разработан и внедрен бесконтактный (фотометрический) метод оценки урожайности естественных сенокосов и пастбищ, а также с.-х. культур, основанный на отражательных свойствах растительного покрова [1]. Фотометрический метод определения продуктивности растительного покрова основывается на взаимосвязи параметров растительного покрова (густоты размещения растений, площади их листовой поверхности, количества надземной растительной массы) с коэффициентами яркости системы почва — растительность. Эти характеристики растительных сообществ, а также отражательные свойства почв и формируют оптические свойства экосистемы на каждом фотометрируемом участке.

\* Калининградский государственный технический университет.

Величина отношения коэффициентов яркости Кпр определяется по формуле

$$K_{пр} = \frac{\frac{M_{дик}}{M_{эик}}}{\frac{M_{дик}}{M_{эик}}} \times \beta, \quad (1)$$

где  $\beta$  — отношение коэффициентов яркости полевого эталона в двух участках спектра  $\lambda_{эик}^{\lambda_{дик}} X_{дик} M_{дик} M_{эик}$  — среднее значение из отсчетов по каждой деланке;  $M_{эик}$ ,  $M_{дик}$  — среднее значение из отсчетов по эталону.

На основании полученных значений спектральных коэффициентов яркости для каждой ассоциации и наземной массы растений, определенной укосным методом, были построены кривые регрессии, связывающие эти два показателя. По оси ординат откладывали значения урожайности растительного покрова, по оси абсцисс — Кпр. Наземная фотометрическая съемка проведена на основании разработанных методик [2, 3].

#### Результаты исследований

Наземные фотометрические наблюдения (1997-1998) были организованы на постоянных пробных площадях опытного полигона песчаного массива Сарыесик-Атырау. Пробные площади были представлены девятью ассоциациями. Наблюдения проводили в разные периоды вегетации. Краткая характеристика ассоциаций позволяет судить о фитоценоотическом разнообразии и местоположении объектов исследований.

Эфемерово-белоземельнопопынно-терескеновая ассоциация — (*Kracheninnikovia ceratoides-Artemisia terrae albae-Carex physodes*) занимает склоны северо-восточных экспозиций песчаных бугров и гряд, а также межбугровые понижения. Понижения имеют более уплотненную поверхность почвы и служат местом стока талых вод.

Жизненные формы эфемерово-белоземельнопопынно-терескеновой ассоциации многообразны: от эфемероидных поликарпических и эфемеровых монокарпических травянистых растений до пустынных деревьев, представленных ценопопуляцией саксаула белого. Общий серовато-седой тон создается фоновыми растениями — терескеном, полынью, и лишь изредка зеленеют кустики крестовника.

В весеннее время буйно вегетируют эфемеры и эфемероиды: *Carex physodes*, *Meniocus linifolius*, *Hypocoum parviflorum*, *Lappnda semiglabra*, *Amobia decumbens*. В верхнем разреженном ярусе выделяются кусты саксаула белого. Основу травостоя составляют терескен и полынь белоземельная, которые по обилию и массе соответствуют 70-80% урожая. Доминант ассоциации терескен серый (*Kracheninnikovia ceratoides*) ксерофильный полукустарник высотой до 120 см. Весеннее отрастание терескена начинается в апреле, интенсивно вегетирует в мае, цветет в июне - июле.

Первое отчуждение наземной растительной массы и замеры спектральных характеристик были произведены в третьей декаде мая 1997 г. Для эфемерово-белоземельнопопынно-терескеновой ассоциации в этот период характерна довольно крутая кривая, что объясняется нарастанием массы полыни и терескена, а также обилием эфемеров, особенно осоки вздутоплодной. Колебания спектральных коэффициентов яркости лежат в пределах 1,21 — 2,25 (рис. 1). Отмечается тесная взаимосвязь урожайности со спектральными коэффициентами, что подтверждается коэффициентами детерминации ( $R^2 = 0,927$ ,  $R^2 = 0,759$ ). В целях уточнения регрессий и получения новых данных в сроки, не охваченные ранее, были проведены замеры в 1998 г. и получены кривые, в целом мало отличающиеся от предыдущего года. В этом случае колебания спектральных характеристик (третья декада мая) лежат в пределах 1,17-2,01 (рис. 2).

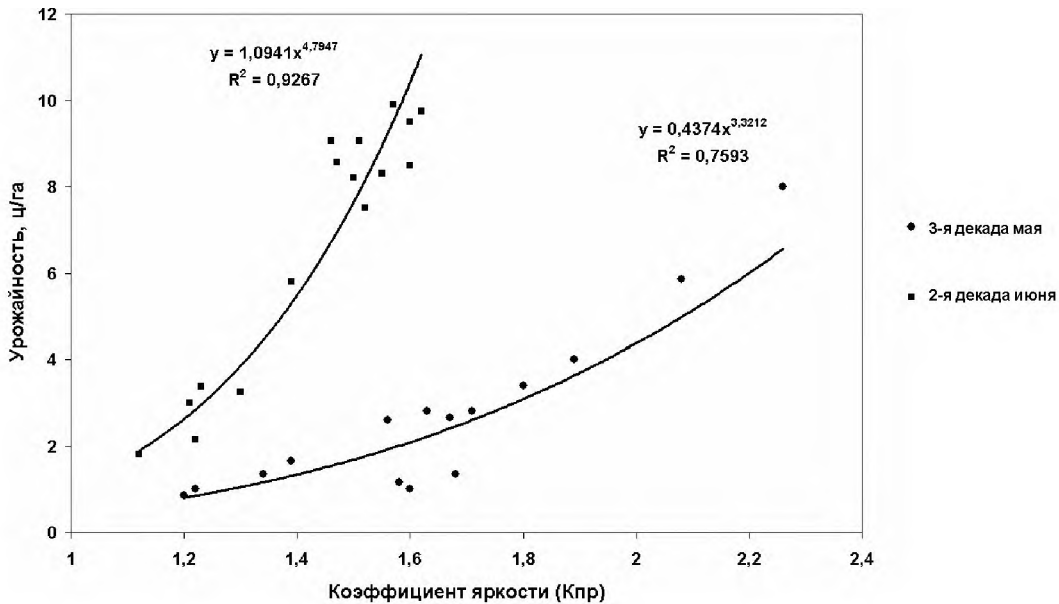


Рис. 1. Взаимосвязь урожайности (сухой массы) эфемерово-белоземельнопопынно-терескеновой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (1997 г.)

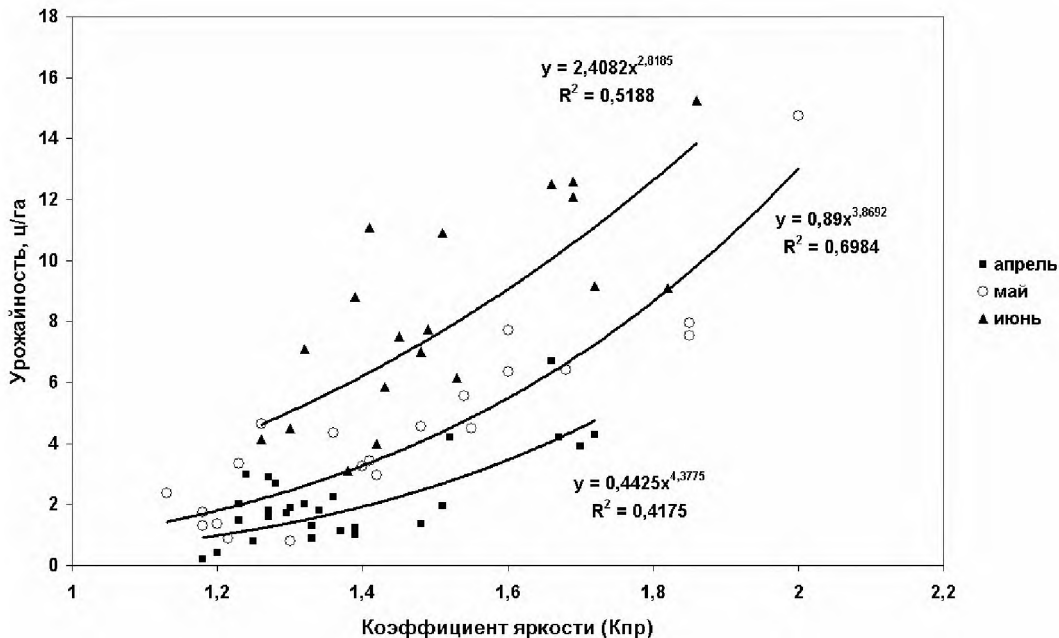


Рис. 2. Взаимосвязь урожайности (сухой фитомассы) эфемерово-белоземельнопопынно-терескеновой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (1998 г.)

Наблюдения, проведенные во второй декаде июня (1998 г.), показывают несколько иную картину. В этот период урожай ассоциации складывается в основном терескеном и полынью. Терескен продолжает вегетировать, у полыни часть листьев опала, генеративные побеги уже сформировались. Основные эфемеры, слагающие ассоциацию, находятся в фазе плодоношения, усыхания и мало влияют на спектральные характеристики. Фенологические изменения повлекли за собой изменения спектральных характеристик. Наблюдается снижение спектральных коэффициентов яркости при увеличении урожайности. Закономерность взаимосвязи урожайности со спектральными коэффициентами яркости сохраняется, что подтверждается соответствующими уравнениями (см. рис. 1, 2).

Кривые урожайности первой и второй декады июля 1997 и 1998 гг. идентичны. Выпавшие из травостоя эфемеры обнажили участки почвы. У полыни белоземельной примерно 70% листьев опало, а у терескена отмечается опадение нижних листьев и переход в фазу бутонизации. Диапазон спектральных характеристик лежит в пределах 1,11 — 1,45 (1997г.) и 1,20-1,87 (1998г.).

Наиболее высокие Кпр для белоземельнополынно-терескеновой ассоциации отмечены в мае - июне. В июле происходит постепенное снижение Кпр, при этом урожайность увеличивается. В этот период средние значения Кпр составляют 1,43 и 1,35 и урожайность соответственно 4,5 и 6,4 ц/га. Увеличение урожая наблюдается до летнего усыхания доминантов.

Эфемерово-кустарниковая ассоциация (*Calligonum aphyllum* + *Astragalus paucijugus* + *Atraphaxis spinosa* — *Haloxylon persicum* — *Carex physodes*) приурочена в основном к разрыхленным вершинам песчаных бугров и гряд и склонам западных экспозиций. Доминантами данной ассоциации являются: саксаул белый, различные виды

джузгунов, астрагал малопарный, курчавка. В растительном покрове отмечается три, иногда четыре яруса. Первый ярус складывается из саксаула белого и джузгунов, достигающих высоты от 1,0 до 2,5 м. Иногда джузгуны с астрагалом располагаются во втором ярусе, третий ярус представлен курчавкой и терескеном и другими многолетними и однолетними растениями. Четвертый ярус, как правило, бывает развит только в весеннее время и представлен в основном эфемерами. Высота этого яруса не превышает 10-15 см. Проективное покрытие составляет 20—25% и только в весеннее время несколько увеличивается за счет обильно вегетирующих эфемеров. Флористический состав данного типа представлен большим количеством видов и отличается разнообразием жизненных форм.

Фотометрирование кустарников в третьей декаде мая проводилось на фоне цветущих и плодоносящих эфемеров. Аспект этого периода характеризуется красочностью и разнообразием. Среди вегетирующих кустарников выделяются желтые пятна цветущего крестовника, зеленые пятна полыни джунгарской.

Из кустарников в качестве объекта исследования были взяты джузгун, астрагал, саксаул белый. При фотометрировании кустарников часто в поле зрения фотометра попадает только вегетирующая масса куста (в случае, если диаметр куста больше площади, попадающей в поле зрения фотометра), поэтому представленные кривые урожайности данного типа пастбищ соответствуют проективному покрытию, превышающему истинное значение. Для каждого вида кустарников были построены отдельные линии регрессии. Распределение спектральных характеристик для майского периода выглядит таким образом: саксаул — 1,17-1,66; джузгун — 1,74-2,32; эфемеры — 1,18-1,27. В третьей декаде мая формирование кустов джузгуна и

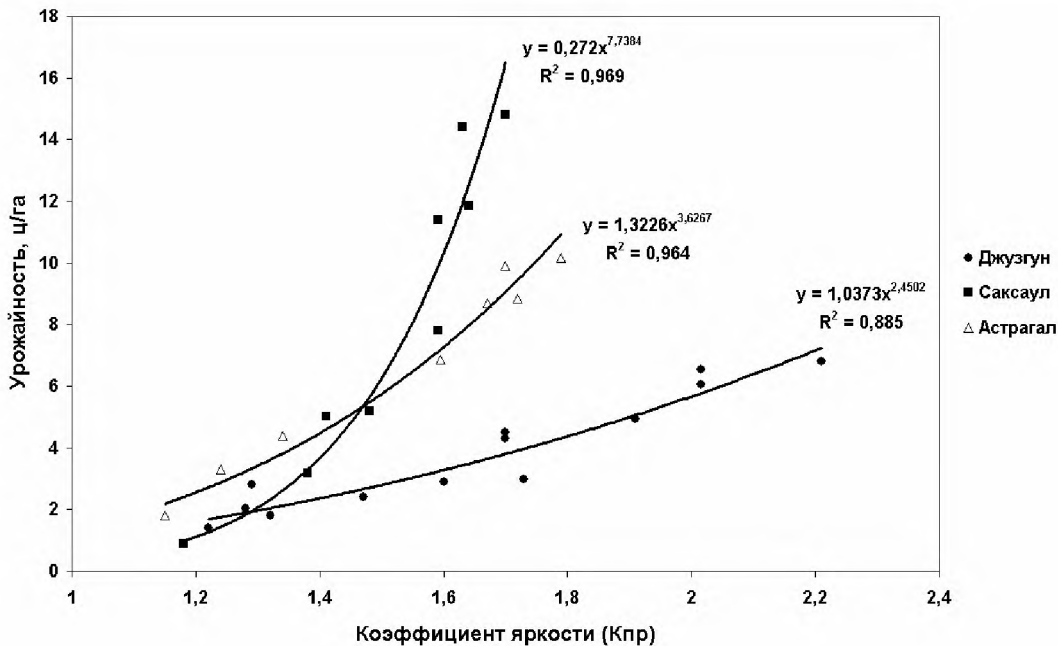


Рис. 3. Взаимосвязь урожайности (сухой массы) эфемерово-кустарниковой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (третья декада мая 1997 г.)

саксаула еще не завершено. Кусты рыхлые, прозрачные на Кпр джужгуна и саксаула оказывает влияние Кпр почвы (рис. 3).

В первой декаде июня джужгун, астрагал, саксаул белый цветут; эфемеры плодоносят. Кусты джужгуна отличаются в этот период темной зеленью, плотным расположением вегетирующей массы, что приводит к исключению экранирующего влияния почвы. Спектральные характеристики джужгуна изменяются в пределах от 1,53 до 3,1; СКЯ астрагала несколько ниже — 1,25-2,88; СКЯ саксаула — 1,16-1,78 (рис. 4, 5).

В первой декаде июля кустарники плодоносят и теряют часть вегетирующей массы; эфемерный ярус разрушается, и большие участки почвы оголены. Спектральные характери-

сти снижаются и имеют следующие значения: для джужгуна — 1,02-2,37; для астрагала — 1,0-1,79; для саксаула — 1,08-1,60 (рис. 6). Выявленная взаимосвязь урожайности и спектральных коэффициентов сохраняется, хотя коэффициенты детерминации объективно ниже, за исключением джужгуна.

В августе начинают грубеть и засыхать зеленые ассимиляционные побеги у джужгуна и зеленовато-сизые — у астрагалов. Аспект приобретает серые оттенки, и только зелеными пятнами выделяются кусты солянки прозрачной. Несмотря на позднелетний аспект, взаимосвязь выявленных параметров сохраняется (рис. 7).

Полученные в наземных условиях связи использованы для оценки состояния почвенно-растительных объектов с вертолета.

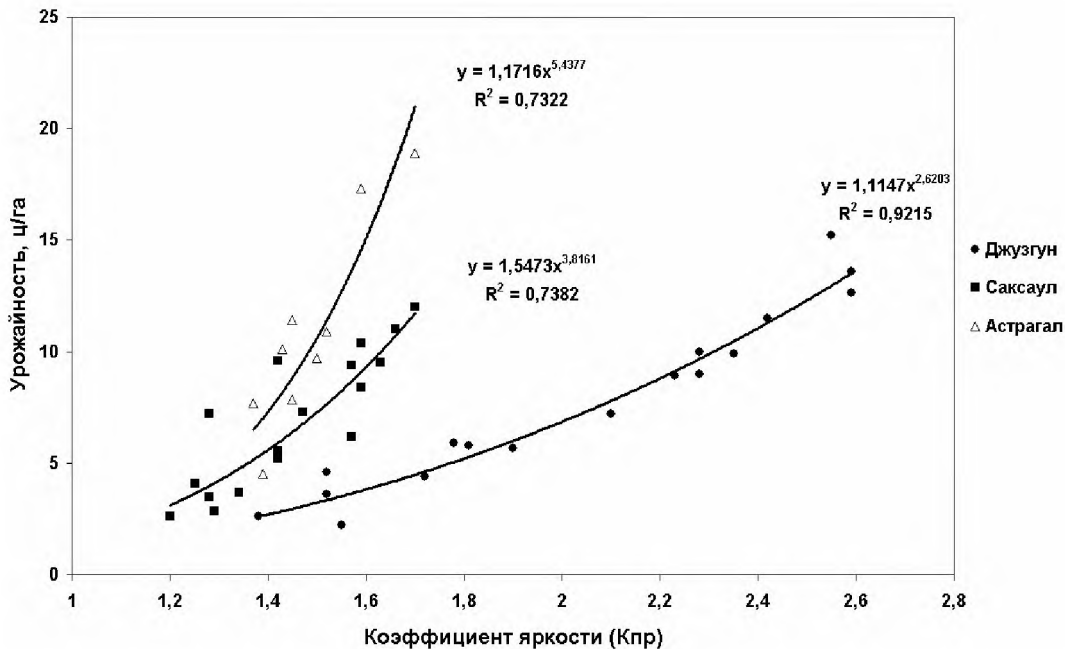


Рис. 4. Взаимосвязь урожайности (сухой массы) эфемерово-кустарниковой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (первая декада июня 1997 г.)

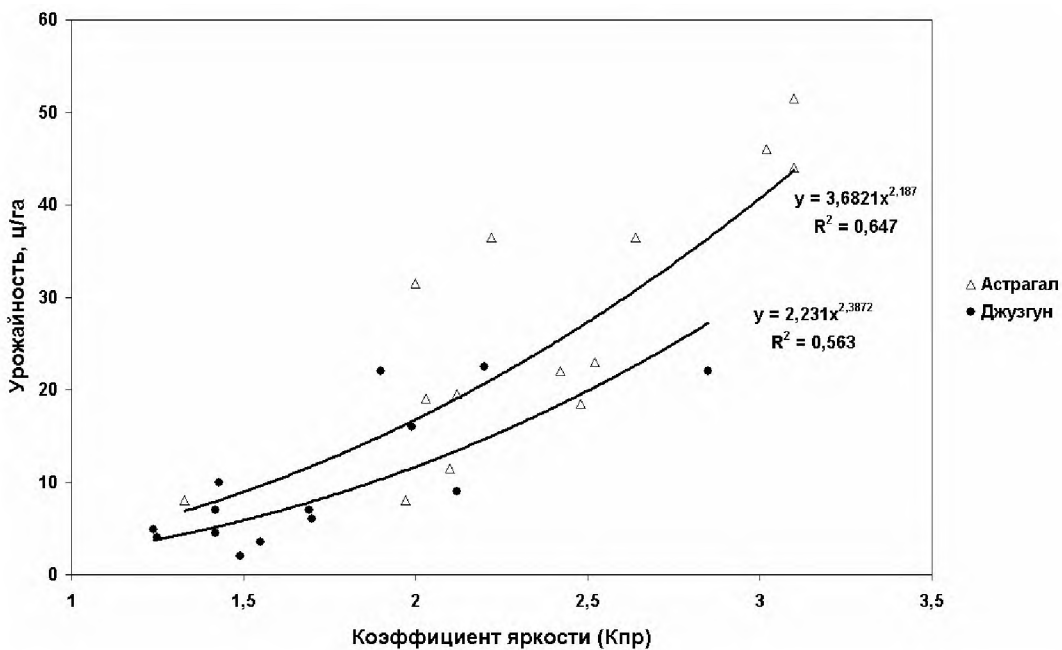


Рис. 5. Взаимосвязь урожайности (сухой массы) эфемерово-кустарниковой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (первая декада июня 1998 г.)

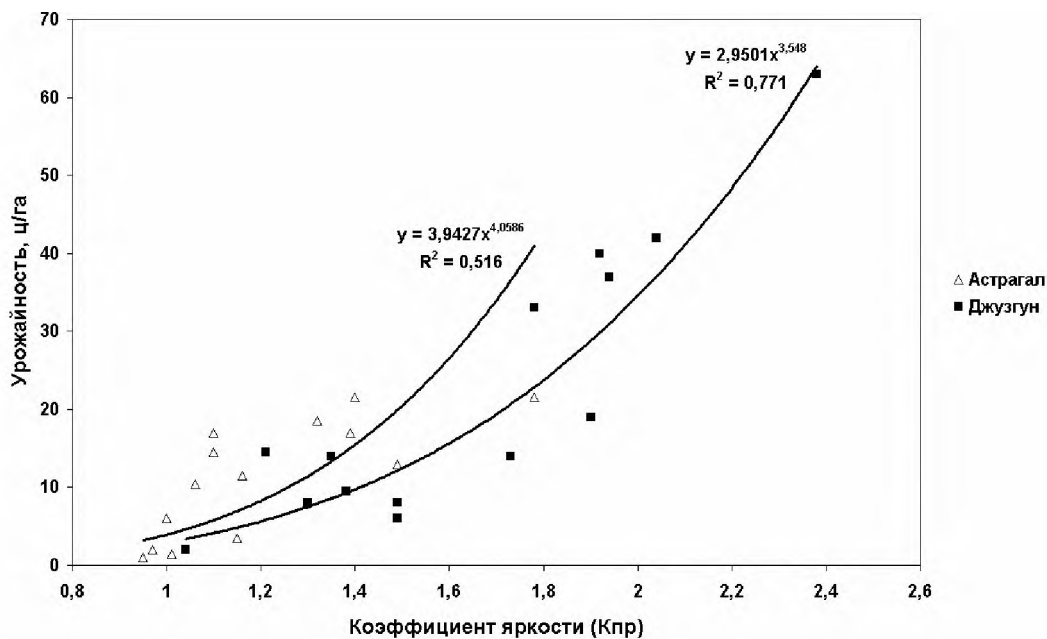


Рис. 6. Взаимосвязь урожайности (сухой массы) эфемеро-кустарниковой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (первая декада июля 1998 г.)

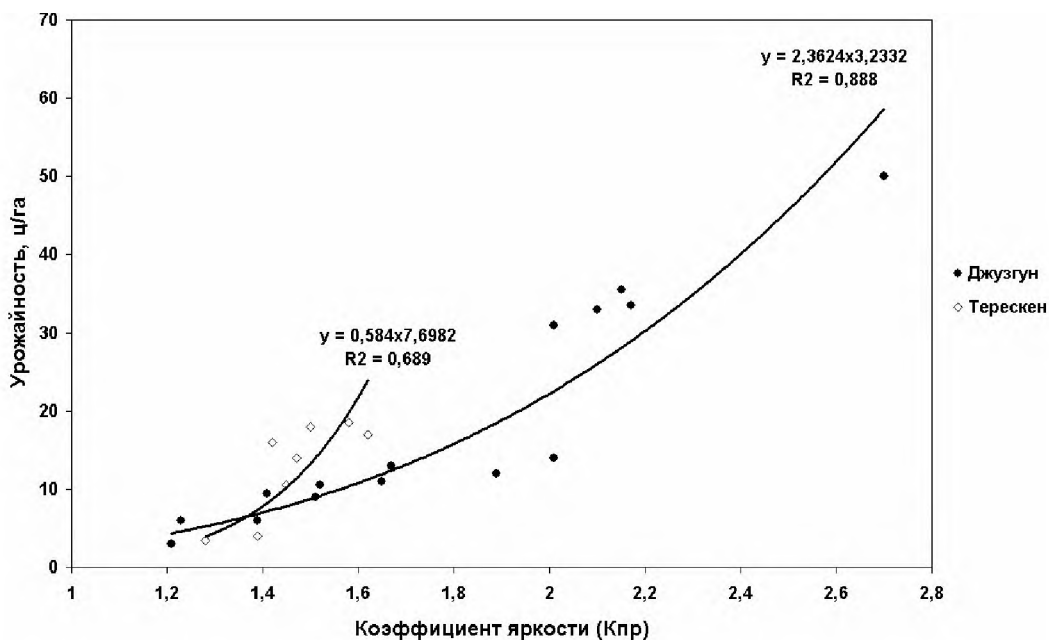


Рис. 7. Взаимосвязь урожайности (сухой массы) терескеново-жузгуново-эфемеро-кустарниковой ассоциации со спектральным коэффициентом яркости (Кпр) по календарным срокам наблюдений (первая декада августа 1998 г.)

## Заключение

Полученные линии регрессии наглядно отражают изменения спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) в течение вегетационного периода.

Спектральные отражательные характеристики объектов зондирования (система почва — растительность) имеют ярко выраженные сезонные изменения. Информация, полученная из данных о временной динамике СКЯ, связанной со сменой фаз вегетации растительности и соответственно с изменением оптических свойств фитоэлементов и их массы с учетом вклада почвы, оказалась особенно полезной при оценке продуктивности пастбищных экосистем [4].

В период от начала вегетации до цветения, когда оптические характеристики листьев и стеблей изменяются незначительно, основным фактором, влияющим на отражательные свойства растительности, является увеличение фитомассы, сопровождающееся повышением вклада растительности в СКЯ системы почва — растительность. При этом СКЯ уменьшается в видимом диапазоне (особенно в его красном участке) и повышается в ближнем ИК-диапазоне, что приводит к увеличению значений вегетационных индексов, являющихся отношением СКЯ соответственно для ИК и красного спектральных каналов.

В период пожелтения надземной фитомассы происходит обратное изме-

нение СКЯ и вегетационных индексов. Во время цветения возможны различные вариации спектральных характеристик.

Экспериментальные данные позволили выявить тесную взаимосвязь между урожайностью и спектральными коэффициентами яркости в разрезе основных ассоциаций (таблица). Однако следует отметить, что подобные значения коэффициентов детерминации присущи поздневесеннему и раннелетнему периодам наблюдений. В эти сроки характерно присутствие эфемеров и эфемероидов, а многолетняя травянистая и кустарниковая растительность практически сформирована, проективное покрытие в отдельных случаях может достигать и 80%.

Наблюдения в позднелетние сроки показали значительное снижение тесных взаимосвязей, что связано с биологическими особенностями развития пустынной растительности. Одновременно экспериментальные данные позволили выявить оптимумы сроков для проведения фотометрических наблюдений. Растительные сообщества и их эдификаторы характеризуются различными отражательными свойствами.

Спектральные коэффициенты яркости значительно изменяются в течение вегетационного периода, что обусловлено изменением фенологического состояния растительности и динамикой нарастания вегетативной массы. Отмечаются два явно выраженных подъема СКЯ в течение вегетационно-

Коэффициенты детерминации взаимосвязи урожайности со спектральными коэффициентами яркости

Ассоциация	Коэффициент детерминации ( $R^2$ )
1. Эфемерово-саксаулово-белоземельнопопынно-кейреуковая	0,75–0,84
2. Биюргуновая	0,5
3. Эфемерово-саксаулово-белоземельнопопынно-терескеновая	0,71–0,85
4. Терескеново-белоземельнопопынно-эфедровая	0,82–0,92
5. Эфемерово-кейреуково-белоземельнопопынная	0,93–0,95
6. Эфемерово-кустарниковая	0,72–0,87
7. Эфемерово-черносаксауловая	0,82
8. Кейреуково-черносаксауловая	0,80
9. Солянково-черносаксауловая	0,85



го периода: первый — весной, при массовом развитии эфемеров и эфемероидов, второй — при накоплении надземной массы кустарников и полукустарников.

Спектральные характеристики кустарниковых и черносаксауловых пастбищ отличаются стабильным и плавным ходом, что обусловлено длительным периодом вегетации кустарников и саксаула. Выявленные закономерные взаимосвязи урожайности со спектральными коэффициентами яркости подтверждаются соответствующими регрессиями с достаточно высокими коэффициентами детерминации.

Выявленные закономерности и полученные регрессии позволяют статистически достоверно определять урожайность надземной фитомассы.

В настоящее время сдерживающим фактором в развитии дистанционных методов оценки состояния почвенно-растительных объектов является недостаток экспериментального материала, позволяющего выявить связи между спектрами отражения и биометрическими характеристиками. В даль-

нейшем необходимо продолжить исследование спектральных характеристик растительного и почвенного покрова как наземным, так и аэрокосмическим методами.

#### Библиографический список

1. Лагунов Д.М. Аэрокосмическая и фотометрическая оценка кормовых ресурсов пустынных лесов / П.М. Лагунов, И.С. Успенский, О.М. Бедарева // Лесное хозяйство. М., 1990. №110. С.35-37.
2. Методические указания по определению параметров растительного покрова методом отношения коэффициентов яркости в двух участках спектра. Ташкент: СарНИГМИ, 1972.
3. Методические указания по определению параметров растительного покрова фотометрическим методом. Ташкент: СарНИГМИ, 1972.
4. Рачкулик В.И. Отражательные свойства и состояние растительного покрова / В.И. Рачкулик, М.В. Ситникова. Л.: Гидрометиздат, 1986.
5. Brown K.G. Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002. Vol. 68. P. 1051-1061.

Рецензент — к с-х. н. А.Н. Поляков

#### SUMMARY

Remote methods to determine the above ground phyto mass of grazing land based on its interrelation with spectral coefficient of brightness are stated in the article. Regressions with rather high coefficients of determination denote possibility of photometric method use when making evaluation of pasture productivity.