УДК 528.88:633.1

Е.Ю. Жукова, А.П. Шевырногов, В.М. Жукова, Т.М. Зоркина, И.Ю. Пугачева

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЦЕНОЗОВ ЮГА МИНУСИНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Представлены результаты сопоставления данных вегетационного индекса (NDVI) сельскохозяйственных культур и надземной растительной массы в пределах двух тестовых участков Минусинской котловины за вегетационный сезон 2006 г.
Ключевые слова: продуктивность агроценозов; Минусинская котловина.

Для оптимизации мониторинга агроценозов важнейшее значение приобретают спутниковые методы. Снимки Modis широко используются для исследования сельскохозяйственных земель [1–3], в частности для построения кривой сезонного хода вегетационного индекса. По отклонениям данного индекса от нормы можно судить о процессах, происходящих в растительности. Главные проблемы дистанционного зондирования агроценозов на территории Минусинской котловины сопряжены с тем, что вопросы совместного использования наземных и спутниковых данных по динамике агроценозов изучены недостаточно. В связи с этим была поставлена цель – сопоставить данные вегетационного индекса для агроценозов на территории юга Минусинской котловины за вегетационный период 2006 г. с динамикой надземной сырой фитомассы культурных сообществ, полученных в ходе наземных исследований.

Объект и методика исследований

В качестве объекта исследования были выбраны посевы овса, пшеницы и гречихи на территории Минусинской котловины. Территория характеризуется небольшим плодородием малогумусных черноземов и каштановых почв, среднегодовым количеством осадков 150–300 мм, суровой бесснежной зимой (среднегодовая температура до –1…–6°С), коротким жарким летом, сильными ветрами в зимне-весенний период. В среднем с одного гектара получают до 0,5–0,9 т зерна, причем урожайность колеблется в зависимости от увлажнения [4].

Для исследования были заложены два тестовых участка. *Тестовый участок 1* относится к Алтайскому холмисто-степному району Койбальского округа, в пределах Южно-Минусинской впадины, занимая северную часть междуречья Абакана и Енисея. Сумма среднесуточных температур воздуха выше 10°С – 1800–2000°С. Сумма осадков за май–июль – 170–210 мм [5]. *Тестовый участок 2* находился на правобережье Енисея, в Минусинской провинции, в пределах Шушенского лесостепного округа. Сельскохозяйственная освоенность территории округа высокая. Сумма среднесуточных температур воздуха выше 10°С – 1700–1800°С. Сумма осадков за май–июль – 170–220 мм [5]. В течение вегетационного сезона были проведены наземные исследования динамики агроценозов в пределах площадок размерами 3×3 пикселя на спутниковом изображении (0,7 га) для небольших участков, например залежь после сенокошения 2×2 пикселя (0,3 га). Координаты участков растительности, где отбирались пробы, фиксировались GPS-приемником.

В работе использовали значения вегетационного индекса, вычисленные по снимкам Terra Modis за вегетационный сезон 2006 г., в даты, ближайшие к датам наземных наблюдений. Оценка состояния агроценозов проводилась по спектральным индексам [6]. Для оценки фотосинтетически активной биомассы и использовали вегетационный индекс (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), рассчитанный по формуле

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED}},$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Обработка снимков и вычисление индекса проводились в программе ENVI 4.0. И.Ю. Пугачевой [7]. На основании контуров *тестовых участков 1* и *2* были построены графики динамики NDVI за 2006 г.

Учет динамики надземной фитомассы в посевах сельскохозяйственных культур, проводился по стандартной методике Ф.И. Левина [8] в пятикратной повторности. Укосы с площадок разбирали по агрогруппам: масса генеративных органов, масса побегов и листьев культурных растений, масса сорных растений и опад, включающий ветошь и мортмассу [9, 10]. Агрогруппы взвешивали в сыром и в сухом (потеря 80% массы) виде, данные переводили в ц/га. Одновременно проводили измерения общего проективного покрытия: ОПП (%) травостоя определяли с помощью сетки размерами 50×50 см с ячейками по 10×10 см по методике Л.Г. Раменского [10], фазы онтогенеза культурных растений [11] и аспекта [10].

Результаты исследований

В 2006 г. на территории Алтайского района обследовано 3 агроценоза овса, наряду с данными по динамике фитомассы исследовались особенности водного режима и пигментного состава растений овса.

Агроценоз овса (**контур 1**) во вторую декаду июня имел проективное покрытие 5–7% (всходы) из-за низких температур в осенний период и более поздних сроков сева. Аспект агроценоза овса (**контур 1**) изменялся от сизо-зеленого (фаза кущения) и зеленого (фаза выметывания), через зелено-желтый (фаза налива) к желтому (фаза созревания) цвету. Общая сырая фитомасса увеличивалась за вегетационный сезон с 35,9 до 91,2 ц/га (рис. 1).

Появление генеративных органов у растений отмечено в середине июля. Сухая генеративная масса составила 17,1 ц/га, в то время как в 2005 г. среднее значение данного показателя не превышало 10 ц/га.

В конце июля NDVI посева овса (**контур 1**) достигал наибольшего значения (0,72) и к сентябрю снижался до 0,53 (рис. 2). Агроценоз овса в середине июля

имел общую массу 73,7 ц/га, находился на стадии выметывания и имел зеленый аспект. В сентябре, несмотря на увеличение фитомассы, NDVI снижался за счет изменения аспекта посева.

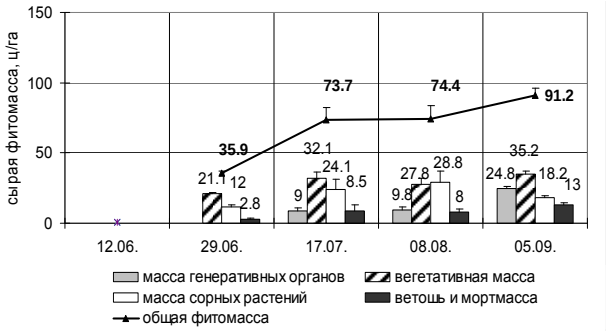

Рис. 1. Динамика сырой фитомассы посева овса (**контур 1**)

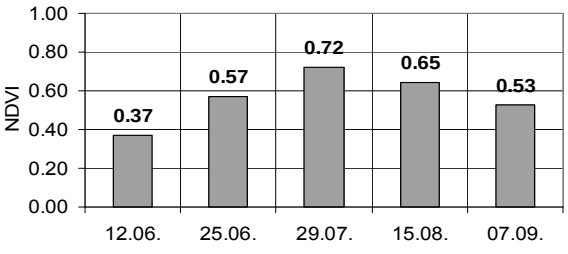

Рис. 2. Динамика NDVI агроценоза овса (**контур 1**)

В формирование фитомассы агроценозов вносит вклад сорная растительность. Так, в **контуре 1** было отмечено массовое и очаговое засорение, в частности *Sonchus arvensis L.* Сырая надземная масса сорных растений в 6–7 раз превышала массу культурных растений, наибольшей сырой фитомассы (186,5 ц/га) сорные растения достигали в первой декаде августа. В июле очаги засорения можно различить по большему ВИ, при этом аспект засоренных *Sonchus arvensis L.* участков в период цветения изменялся с зеленого на желтый.

Для агроценоза овса (**контур 3**) наблюдали несколько иную смену аспектов – от сизо-зеленого (фаза кущения) и зеленого (фаза выметывания) к зеленожелтому цвету (фаза налива). С третьей декады июня по вторую декаду июля общая сырая фитомасса увеличилась с 32,4 до 75,2 ц/га, затем постепенно снизилась до 60,3 ц/га (рис. 3).

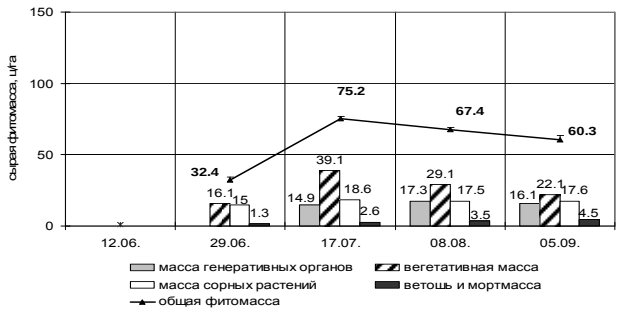

Рис. 3. Динамика сырой фитомассы посева овса (**контур 3**)

Посев овса (**контур 3**) имел наибольшее значение NDVI (0,84) в конце июля, в середине июля соответствующее значение общей массы составило 76,2 ц/га. К сентябрю NDVI снижался до 0,58, в этот период фитомасса достигала 60,3 ц/га (рис. 4).

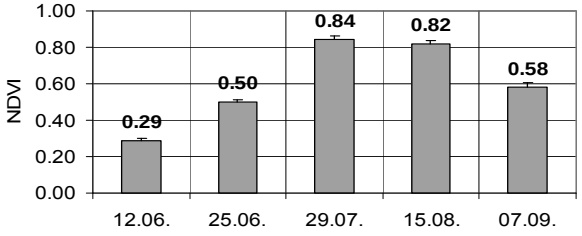

Рис. 4. Динамика NDVI агроценоза овса (**контур 3**)

Таким образом, в Алтайском районе NDVI посевов овса достигал максимальных значений к концу июля, что в целом коррелировало с динамикой фитомассы и аспектом фитоценозов, наибольшие значения NDVI были отмечены для **контура 3**. Для овса было характерно изменение аспекта от сизо-зеленого (фазы всходов и кущения), через зеленый (фазы выхода в трубку и выметывания), желто-зеленый (фазы формирования и налива зерна) к желтому цвету (фаза созревания). При значительной засоренности посевов (свыше 40%) сорная растительность вносила свой аспект в общий цветовой фон. Наибольшие различия в аспектах сорных и культурных растений наблюдали в фазу молочной спелости, т.к. в этот период зерновые культуры приобретают желтую окраску, а сорняки остаются зелеными. Максимальной массы сорные растения достигали в августе-сентябре.

В Минусинском районе за вегетационный период 2006 г. было обследовано 5 агроценозов пшеницы.

Рассмотрим подробнее динамику сырой надземной фитомассы агроценоза пшеницы (**контур 1**). В середине июня 2006 г. растения пшеницы находились только на стадии всходов, ОПП в этот период составило всего 0,5–1,5%. К сентябрю данный показатель составил 55–65%. Аспект пшеницы изменялся от зеленого во второй декаде июня (фаза всходы), через зеленый с желтым оттенком во второй декаде августа (фаза налива) и желтого с зеленым оттенком в начале сентября (фаза созревания). Общая сырая фитомасса посева пшеницы (**контур 1**) нарастала с первой до второй декады июля в 2,4 раза, достигая 99,6 ц/га, и в дальнейшем снижаясь до 54 ц/га (рис. 5).

Рис. 5. Динамика сырой фитомассы посева пшеницы (**контур 1**)

В то же время, начиная со второй декады июня и до третьей декады июля, NDVI возрастал с 0,31 до 0,78 и постепенно снижался к первой декаде сентября (рис. 6).

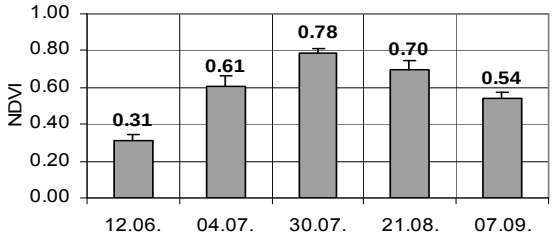

Рис. 6. Динамика NDVI агроценоза пшеницы (**контур 1**)

Для сравнения: агроценоз пшеницы (**контур 2**) показал в середине июня наличие сырой фитомассы – 16,8 ц/га (рис. 7). В этот период данным по сырой фитомассе соответствовало более высокое, по сравнению с **контуром 1,** проективное покрытие – 40–50% с максимальным значением во второй декаде июля. Аспект пшеницы изменялся от зеленого в июне – начале июля (фаза кущения и начало колошения), через желто-зеленый во второй декаде июля (фаза налива) до желтого в августе–сентябре (фаза созревание) цвета.

Агроценоз пшеницы (**контур 2**) в начале наблюдения, в отличие от **контура 1**, имел значительную сырую фитомассу – 16,8 ц/га, что нашло отражение в динамике NDVI. В данный период показатели NDVI составили в **контурах 2** и **1** 0,40 и 0,31 (рис. 7, 8).

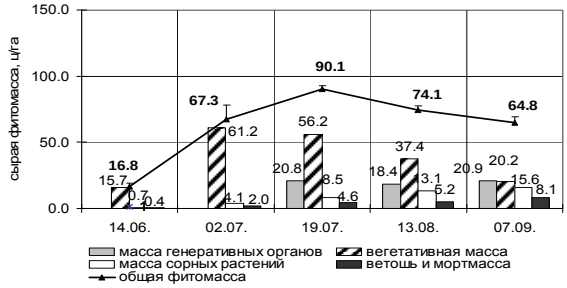

Рис. 7. Динамика сырой фитомассы посева пшеницы (**контур 2**)

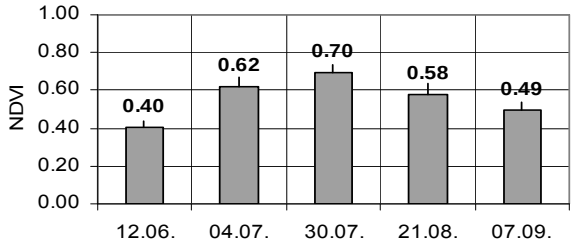

Рис. 8. Динамика NDVI агроценоза пшеницы (**контур 2**)

Общая сырая фитомасса посева пшеницы (**контур 2**) увеличивалась с 16,8 до 90,1 ц/га во вторую декаду июля и снижалась до 64,8 ц/га к сентябрю.

Таким образом, **контур 1** имел наибольшие значения NDVI (0,78) и отличался более интенсивным увеличением ВИ в июле, чем **контур 2**. Спутниковые данные подтвердили наземную информацию о том, что в июне **контур 2** имел большую фитомассу, чем **контур 1**.

Агроценоз пшеницы (**контур 5**) представлен посевом на зеленую массу. В состав данного сообщества входила пшеница и *Panicum dichotomiflorum Michx.* (просо ветвисто-метельчатое). Общая сырая масса посева нарастала с первой декады июля (21,6 ц/га) по вторую декаду августа (52,4 ц/га) и незначительно снижалась к сентябрю (рис. 9).

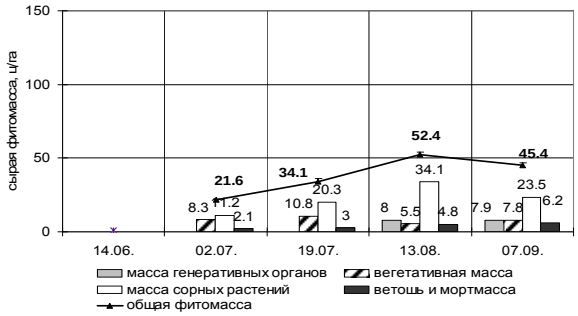

Рис. 9. Динамика сырой фитомассы посева пшеницы на зеленую массу (**контур 5**)

NDVI данного агроценоза возрастал с середины июня (0,43) до второй декады июля (0,73) и несколько снижался к сентябрю (0,65) (рис. 10).

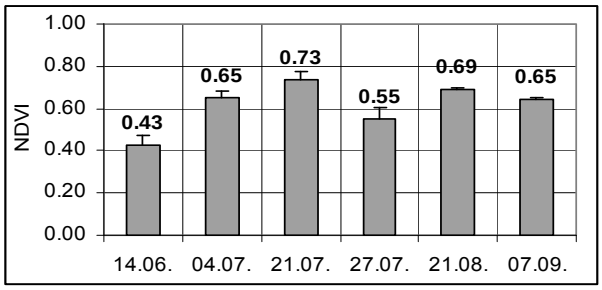

Рис. 10. Динамика NDVI агроценоза пшеницы на зеленую массу (**контур 5**)

Panicum dichotomiflorum Michx. во время плодоношения (конец июля – начало сентября) характеризовался коричневато-зеленым аспектом. В начале сентября NDVI имел более высокое значение по сравнению с остальными контурами пшеницы, что связано с ОПП посева и его аспектом.

В 2006 г. наблюдали задержку в развитии зерновых культур из-за неблагоприятных агрометеорологических условий (заморозки). В начале вегетационного сезона сырая фитомасса пшеницы была больше фитомассы овса в 2–3 раза. К третьей декаде июля фитомасса овса увеличивалась и различия с пшеницей по фитомассе уменьшались. При этом наблюдали различие в аспектах: у овса зеленый, а у пшеницы – желтовато-зеленый. Для зерновых культур в июне–июле преобладала масса вегетативных органов, со второй декады июля происходило формирование генеративной массы, и в дальнейшем данный показатель увеличивался вплоть до преобладания над другими агрогруппами.

В Минусинском районе посев гречихи (**контур 7**) в середине июня был представлен всходами. С середины июня до середины июля отмечено быстрое увеличение общего проективного покрытия до 95–100% и снижение показателя к сентябрю за счет опадения листьев (78–86%), поэтому опад в данном посеве составил 22,6 ц/га.

Аспект гречихи в течение вегетационного периода изменялся – с зеленого на начало бутонизации, через беловато-зеленый в период массового цветения, до красновато-бурого цвета на стадии созревания урожая.

С первой декады июля общая сырая фитомасса увеличивалась с 56,5 до 256,7 ц/га ко второй декаде июля, к сентябрю отмечалось снижение до 82,8 ц/га (рис. 11).

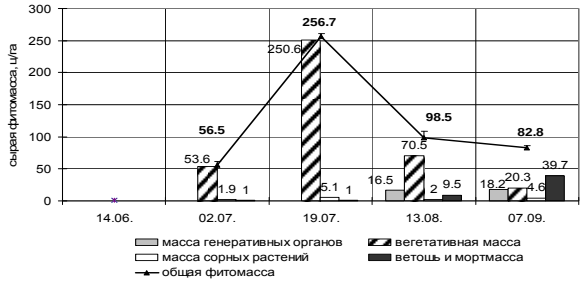

Рис. 11. Динамика сырой фитомассы посева гречихи (**контур 7**)

Посев гречихи (**контур 7**) в середине июня представлен всходами и имел NDVI=0,39, в конце июля NDVI достигал максимального значения 0,77 и к сентябрю снижался до 0,57 (рис. 12). Быстрый прирост гречихи в начале июля наблюдали и в динамике вегетационного индекса.

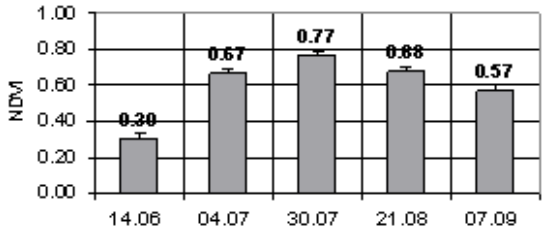

Рис. 12. Динамика NDVI агроценоза гречихи (**контур 7**)

Пропашные культуры отличаются от прочих более поздними сроками посадки и значительно большей надземной фитомассой, а также различием в аспектах.

В результате анализа полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. Показана возможность изучения состояния растительности посевов овса, пшеницы, гречихи и кострецовых залежей по спектральным характеристикам спутниковых изображений Modis (в течение вегетационного сезона) в семиаридных условиях Минусинской котловины.

2. Предложены оптимальные стадии для анализа состояния агроценозов космической съемки на территории тестовых участков Минусинской котловины: а) стадия интенсивного кущения – выход в трубку посевов; б) стадия массового развития генеративных органов; в) стадия созревания.

3. Сорная растительность, накапливающая большую фитомассу, влияет на значения спектральных характеристик, в частности повышая значения вегетационного индекса. Например, для агроценоза, состоящего из пшеницы и *Panicum dichotomiflorum Michx.*, в сентябре были получены более высокие значения индексов по сравнению с остальными посевами пшеницы.

4. Показаны количественные различия по спутниковым и наземным данным в параметрах состояния в различных типах агроценозов. Например, сходные максимальные значения NDVI в июле (0,77–0,78) соответствуют посевам с различной продуктивностью сырой надземной фитомассы – 256,7 ц/га (гречиха), 99,6 ц/га (пшеница).

5. Показано, что для правильной интерпретации спутниковой информации необходимо учитывать экологические условия вегетационного сезона, сроки прохождения фаз развития культурными растениями и особенности динамики прироста надземной фитомассы агроценозов, поскольку одинаковые культуры могут иметь различный аспект в разные фазы онтогенеза, а скорость смены фенофаз зависит от экологических условий.

Такой комплексный подход к интерпретации спутниковых данных при мониторинге агроценозов позволяет объяснить отдельные элементы кривой сезонного хода вегетационной кривой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Созинов А.А.* Агросфера как объект целевого исследования с помощью ДЗЗ и ГИС для улучшения управления территориальным развитием и сохранения природного разнообразия // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Сер. География. 2004. Т. 17 (56), № 2. С. 72–87.
2. *Барталев С.А.* Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным Modis // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.
3. *Повх В.И.* Космический мониторинг сельскохозяйственных угодий Ростовской области // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 89–96.
4. *Савостьянов В.К.* Решая задачи эффективного и экологически безопасного ведения сельскохозяйственного производства в аридной зоне Алтае-Саянского экорегиона. Абакан: Март, 2007. 36–37 с.
5. *Лысанова Г.И.* Ландшафтный анализ агроприродного потенциала геосистем / Под ред. Ю.М. Семенова. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2001. 187 с.
6. *Chen D.* Vegetation water content estimation for corn and soybeans using spectral indices derived from MODIS near- and short-wave infrared bands // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol. 98. P. 225–236.
7. *Пугачева И.Ю.* Мониторинг состояния посевов сельскохозяйственных культур по динамике вегетационного индекса // Решетневские чтения: Материалы XI Междунар. науч. конф., посв. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева / Под ред. И.В. Ковалева. Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2007. С. 94.
8. *Родин Л.Е.* Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах. Л.: Наука, 1968. 143 с.
9. *Словарь-справочник* по агрофитоценологии и луговедению / А.М. Гродзинский, Ю.А. Злобин, В.М. Миркин, Л.Г. Наумова; Под ред. А.М. Гродзинского, Ю.Р. Шеляг-Сосонко. Киев: Наукова думка, 1991. 136 с.
10. *Вавилов П.П.* Практикум по растениеводству. М.: Колос, 1983. 352 с.
11. *Зоркина Т.М.* Фитоценология: Учеб.-метод. пособие для студентов. Абакан: Изд-во Хакас. гос. ун-та, 2003. 48 с.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 20 февраля 2009 г.