

УДК 528.88:528.87:528.855

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ПЕРМСКОМ КРАЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

С.В. Пьянков, Н.А. Калинин, Е.М. Связов, А.А. Смирнова, И.Б. Некрасов

Пермский государственный университет, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Управление сельскохозяйственным производством, особенно в регионах с рискованным земледелием, должно быть основано на принципах постоянного контроля проведения агротехнических и агрохимических мероприятий, условий пофазового развития культур, уточнения урожайности и валовых сборов. Объективные данные о состоянии сельскохозяйственных культур на больших территориях можно получать на региональном уровне только с использованием данных дистанционного (спутникового) зондирования. Использование этих данных позволяет существенно снизить материальные затраты на проведение мониторинга сельскохозяйственных угодий на больших площадях. С учетом пространственного характера поставленных выше задач, наиболее подходящим инструментом для проведения исследований в этой области служат геоинформационные системы. Для получения сведений о состоянии и условиях произрастания сельскохозяйственных культур использовались данные спектрорадиометра MODIS, полученные со спутника Terra. В программе Image Processor по специальным алгоритмам производился расчет температуры земной поверхности и оценивалось состояние растительности. Далее средствами ArcGIS строились карты состояния растительности, температуры земной поверхности и индекса засухи.

В целях оперативного мониторинга за состоянием сельскохозяйственных угодий необходимо совершенствовать методы получения информации о состоянии и условиях развития растительности. Одним из таких методов является спутниковое зондирование. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса (ДДЗЗ) позволяют неконтактно оценить условия вегетации растений на больших площадях по отражательным свойствам подстилающей поверхности. При этом нужно помнить, что на отражательные свойства поверхности влияет ряд факторов, таких как фенологическое состояние растительности, преобладающий вид растений, степень повреждения растений, засоренность полей, а также условия производства наблюдений (угол наблюдения, высота солнца, условия освещенности, прозрачность атмосферы), калибровка сканирующей аппаратуры, условия погоды и тип почвы (Голубятников, Денисенко, 2006).

Растительность поглощает солнечную радиацию преимущественно в видимом (красном) диапазоне солнечного спектра (0,58–0,68 мкм), отражает и рассеивает ее в ближнем инфракрасном диапазоне (0,73–1,1 мкм). Электромагнитный световой спектр растительности зависит от ее типа, изменяется по мере естественного развития растений, а также способен аномально

изменяться в процессе вегетации из-за влияния факторов внешней среды. Эти свойства были положены в основу метода дистанционного космического зондирования для нужд сельского хозяйства.

В данном исследовании для получения сведений о состоянии культур используются космические снимки Terra и Aqua (разрешением 250–1000 м), Landsat, IRS (разрешением 5,8 - 30 м). Обработка космических снимков производится на базе программных средств ScanEx Image Processor. Период исследования: апрель-июль 2008 г.

Количественные оценки состояния растительности проводятся с использованием нормализованного дифференциального вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index - *NDVI*), который рассчитывается следующим образом:

$$NDVI = \frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1},$$

где R_2 — значение отражения в ближней инфракрасной области спектра; R_1 — значение отражения в красной области спектра. *NDVI* может быть рассчитан на основе спутниковой информации, имеющей спектральные каналы в красном (0,62–0,69 мкм) и ближнем инфракрасном (0,75–0,9 мкм) диапазонах. Значение этой вели-

чины может изменяться от -1 до 1 . Для подстилающей поверхности, покрытой зеленой растительностью, величина R_2 всегда больше величины R_1 . На основе спутниковых и наземных измерений установлено, что для растений в нормальном состоянии $NDVI$ близок к $0,6-0,65$, низкие значения $NDVI$ (порядка $0,3-0,4$) свидетельствуют о недостатке влаги или о заболевании растений (Голубятников, Денисенко, 2006). В общем случае принимается, что величина $NDVI$ пропорциональна общей биомассе растений.

При выполнении исследования при расчете $NDVI$ были исключены пиксели космического изображения, соответствующие водным объектам, облачности и снежному покрову путем расчета масок. После обработки, содержащей процедуры настройки отображения каналов изображения, информация сохранялась в растровом формате и экспортировалась в базу данных по сельскохозяйственным угодьям. Для получения карт состояния растительности это изображение подгружалось в проект ArcGIS, где последовательно выполнялись процедуры по отнесению значений к одному из классов состояний и попиксельному экспорту значений

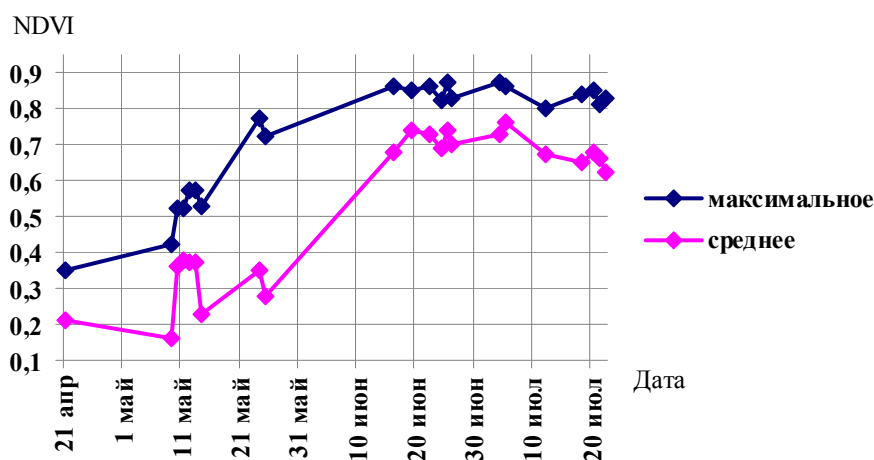
$NDVI$ в формат базы данных. Поскольку космическое изображение охватывает значительную территорию, то на карте распределения $NDVI$ представлено состояние не только сельскохозяйственной растительности, но также лесов и необрабатываемых территорий. Для исключения лишней информации на карту $NDVI$ накладывалась маска сельскохозяйственных полей территории исследования, по которой «вырезались» значения $NDVI$, относящиеся к полям.

Нормализованный вегетационный индекс характеризует плотность растительности, а, следовательно, продуктивность угодий. Состояние растительности, оцененное через $NDVI$, существенно изменяется в процессе развития растений. Так, от момента начала вегетации сельскохозяйственные растения накапливают фитомассу и, следовательно, величина индекса увеличивается; в конце июня – июле величина фитомассы достигает максимума, после которого в процессе формирования урожая и уборки отмечается ее уменьшение и снижение значений $NDVI$ (табл. 1).

Таблица 1

Состояние растительности в соответствии со значениями вегетационных индексов

Значение индекса $NDVI$	Состояние растительности
0-0,1	Открытая почва или нет данных (облачность на космолетке)
0,1-0,2	Разреженная растительность
0,2-0,3	Угнетенное
0,3-0,4	Очень плохое
0,4-0,55	Удовлетворительное
0,55-0,7	Хорошее
0,7-1,0	Очень хорошее

Рис. 1. Временной ход значений вегетационного индекса $NDVI$

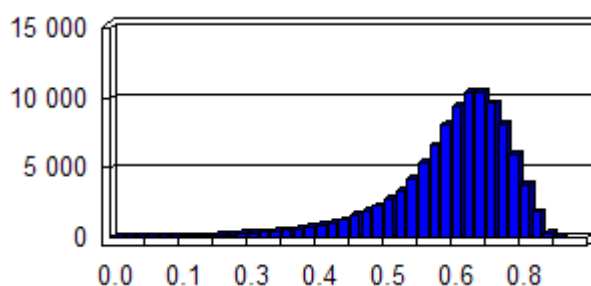


Рис. 2. Плотность распределения индексов вегетации (22.07.2008)

Значения вегетационных индексов для полей исследуемого района оценивались по ряду параметров: средние значения, их отклонения и экстремальные значения. График временного хода максимальных и средних значений $NDVI$ приведен на рис. 1.

График отображает процесс активного накопления биомассы сельскохозяйственной растительности от начала вегетации до третьей декады июля, когда достигается максимум значений. В период вегетации с 9 по 15 мая отмечается локальный максимум значений индекса, связанный с влиянием двух основных факторов: 1) отсутствие маски облачности при расчете значений $NDVI$; 2) смена информационных ресурсов с увеличением разрешения космического изображения с 1 км до 250 м. Наибольшие значения $NDVI$ отмечаются в период с 16 июня по 5 июля. Абсолютного максимума $NDVI$ достигает 25 июня (0,87), затем значения индекса начинают незначительно понижаться. Среднее значение $NDVI$ изменяется от 0,16 (9 мая) до 0,76 (5 июля). Можно отметить, что значения индекса 0,4 и выше соответствуют удовлетворительному, а выше 0,55 — хорошему состоянию растительности. Таким образом, согласно данным, приведенным на рис. 1, посевы на территории исследования достигли удовлетворительного состояния к началу июня и активно наращивали биомассу в первой декаде июня, достигнув хорошего состояния к началу второй декады июня. К сожалению, в результате значительной облачности над исследуемой территорией в течение третьей декады июля и в августе в распоряжение авторов не поступила информация о временном ходе $NDVI$ в этот период, однако по распределению индекса вегетации можно отметить тенденцию к снижению значений $NDVI$ во второй декаде июля, что говорит о том, что после 10 июля рост и развитие сельскохозяйственной растительности прекратились. На рис. 2 приведена гистограмма плотности распределения значений $NDVI$ за 22 июля 2008 г.

Гистограмма является одновершинной с сильной правосторонней асимметрией. Значения $NDVI$ близкие к нулю соответствуют пикселям изображения, находящимся вблизи границы облачности, исключенной наложением соответствующей маски, либо изображениям запаханых или убранных полей. Гистограмма показывает, что модальные значения $NDVI$ составляют 0,6–0,7, а правая асимметрия позволяет судить о том, что в этот день на тер-

ритории исследования преобладает сельскохозяйственная растительность, находящаяся в удовлетворительном и хорошем состоянии.

Для оценки изменения в ходе $NDVI$ в период массового созревания зерновых культур была прослежена тенденция состояния растительности на основе сравнения карт $NDVI$ за период с 5 по 20 июля 2008 г., когда начинают уменьшаться значения $NDVI$. Оценка изменений вегетационного индекса производилась средствами модуля Spatial Analyst программного комплекса ArcGIS с использованием уравнения

$$\Delta NDVI = \frac{NDVI_2 - NDVI_1}{NDVI_2 + NDVI_1},$$

где $NDVI_1$ — состояние сельскохозяйственной растительности за 05.07.2008 г., $NDVI_2$ — состояние растительности за 20.07.2008 г. Изменение состояния растительности фиксировалось по соответствию значений $\Delta NDVI$ критериальным параметрам, приведенным в табл. 2.

Можно отметить, что существенного изменения в состоянии растительности в данный период не произошло. В основном на всей территории края и в сельскохозяйственных районах сохраняются значения накопленной биомассы. Однако в южных сельскохозяйственных районах отмечаются отдельные зоны, в которых произошло ухудшение состояния растительности, а также зоны, где состояние растительности улучшилось. Первые в основном соответствуют полям, на которых началась уборка зерновых культур и однолетних трав, вторые относятся к необрабатываемым территориям и полям, засеянным многолетними травами.

Засуха — явление, сопровождающееся повышенным фоном ночных и дневных значений температуры при отсутствии осадков. Такие погодные условия очень негативно влияют на сельскохозяйственные растения, вызывая их угнетение и последующее снижение урожайности. Выявление признаков засухи производилось с помощью индекса засухи (Index of Drought — ID) как отношение суммы дневной (максимальной) (T_d) и ночной (минимальной) (T_n) суточных значений температуры к

Изменение состояния растительности

Значение разности $NDVI$	Тенденция состояния растительности
$-1 \div -0,69$	Значительное ухудшение
$-0,6 \div -0,2$	Ухудшение
$-0,2 \div 0,2$	Без изменения
$0,2 \div 0,6$	Улучшение
$0,6 \div 1,0$	Значительное улучшение

значению нормализованного вегетационного индекса за эти же сутки (Щербенко и др., 2004):

$$ID = \frac{T_d + T_n}{NDVI}.$$

Здесь T_d и T_n приведены в единицах яркостной температуры. Чем выше значение индекса засухи, тем с большей вероятностью на исследуемой территории отмечается засуха. Значение индекса 1200–1400 свидетельствует о наступлении слабой засухи (растения угнетены, но жизнеспособны), 1400–1600 — наступлении средней и сильной засухи (растения существенно угнетены), более 1600 — наступлении катастрофической засухи (полная гибель растений). Расчет индекса засухи производился в программном комплексе ArcGIS с помощью модуля Spatial Analyst. Засуха не является быстро-развивающимся и быстропротекающим явлением, ее наступление происходит в результате накопления причин, вызывающих угнетение растений, поэтому отслеживать признаки начала засухи необходимо при благоприятных условиях ее развития за длительный промежуток времени. В течение вегетации 2008 г. были взяты два бездождных периода с высокой экстремальной температурой: третья декада июня и третья декада июля. Построение карты засух ни в один из периодов не выявило наступления засухи как в 10 исследуемых хозяйствах, так и на всей территории Пермского края. В третьей декаде июля на карте можно выделить отдельные пиксели, в которых отмечается слабая, средняя или сильная засуха. Был проведен анализ данных, который показал, что такие результаты являются следствием занижения значений $NDVI$ в данных пикселях в результате влияния облачности и облачной тени.

Данные ДЗЗ служат не только для оперативной оценки качественного состояния растительности и подстилающей поверхности. По данным космосъемки может быть определен ряд специфических агрономических характеристик. Но поскольку данные зондирования являются неконтактной информацией, то они требуют разработки определенных алгоритмов перехода от яркостной отражаемости в различных спектральных каналах снимка к принятым агрономическим характеристикам. Для этого, а также для получения и анализа ряда сведений о состоянии посевов на полях необходимо сравнивать полученные значения по ДЗЗ с данными контактных подспутниковых наблюдений. По данным синхронных наблюдений на сельскохозяйственных полях оцениваются дата сева, фаза развития культуры, количество и высота растений, урожайность

зеленой массы, содержание и сбор сухого вещества, биологическая урожайность и т.д. Такие характеристики, с одной стороны, расширяют сведения о состоянии сельскохозяйственных культур, с другой — служат критерием точности и нормировки идентификационных параметров ДДЗЗ. Накопление сведений и выявление статистических связей между ДДЗЗ и данными подспутниковых наблюдений при достижении удовлетворительной точности результатов дешифровки дистанционными средствами позволят практически полностью отказаться от контактных наблюдений на полях, за исключением обязательных агрономических обследований. Кроме того, определение видового состава сельскохозяйственных культур по ДДЗЗ позволит контролировать соблюдение севооборота и оценивать площади обрабатываемых земель.

Для идентификации (определения видового состава) посевов были выбраны единовременные мультиспектральные снимки IRS за 2008 г. и данные полевых обследований за этот же год. Причем снимки были выбраны за период с конца июня по начало июля, когда большинство посевов сельскохозяйственных культур максимально накапливают фитомассу, что соответствует наибольшим значениям $NDVI$. Значения яркости из спектральных каналов осреднялись в пределах контуров тестовых полей и наносились на график в виде точек, где по оси X были отложены значения яркости в красном диапазоне, а по оси Y — значения яркости в ближнем инфракрасном диапазоне (рис. 3). В результате по значениям яркости сельскохозяйственных полей в пространстве спектральных признаков были выделены три области. Первая область — поля, находящиеся под паром — располагается вблизи линии почв (Книжников и др., 2005). Вторая область, расположенная на графике правее и чуть выше первой, соответствует полям с посадками картофеля. Такое расположение области объясняется особенностями возделывания этой культуры с учетом того факта, что среднее по полю значение яркости складывается из значений яркости растений картофеля и значений яркости междурядий, где почва практически свободна от растительности. Третья область значений расположена в левой части графика, выше линии почв. Значения яркости в этой области относятся к полям с зерновыми культурами и полям с многолетними травами. Она образована пересечением двух зон: одна из них относится к полям с многолетними травами, другая — к полям с зерновыми культурами. Поля с многолетними травами, имеющими высокие значения фитомассы и, как следствие, высокие значения яркости в ближнем инфракрасном диапазоне, могут быть идентифици-

рованы по данному графику, так как они расположены в левой верхней части графика и не перекрываются зоной, соответствующей зерновым культурам.

При использовании разновременных снимков одной и той же территории была получена картина распределения сельскохозяйственных полей в пространстве спектральных признаков (рис. 4). На рисунке по оси X отложено значение $NDVI$ на дату,

близкую к максимальным значениям данного индекса ($NDVI_1$); по оси Y - значения $NDVI$ по снимкам, полученным через месяц ($NDVI_2$). По данному графику видно, что кроме паров и полей с картофелем хорошо выделяются поля с озимыми культурами. Это связано с тем, что на дату получения снимка (конец июля) у озимых начался процесс созревания зерна и, как следствие, происходит уменьшение фитомассы растений.

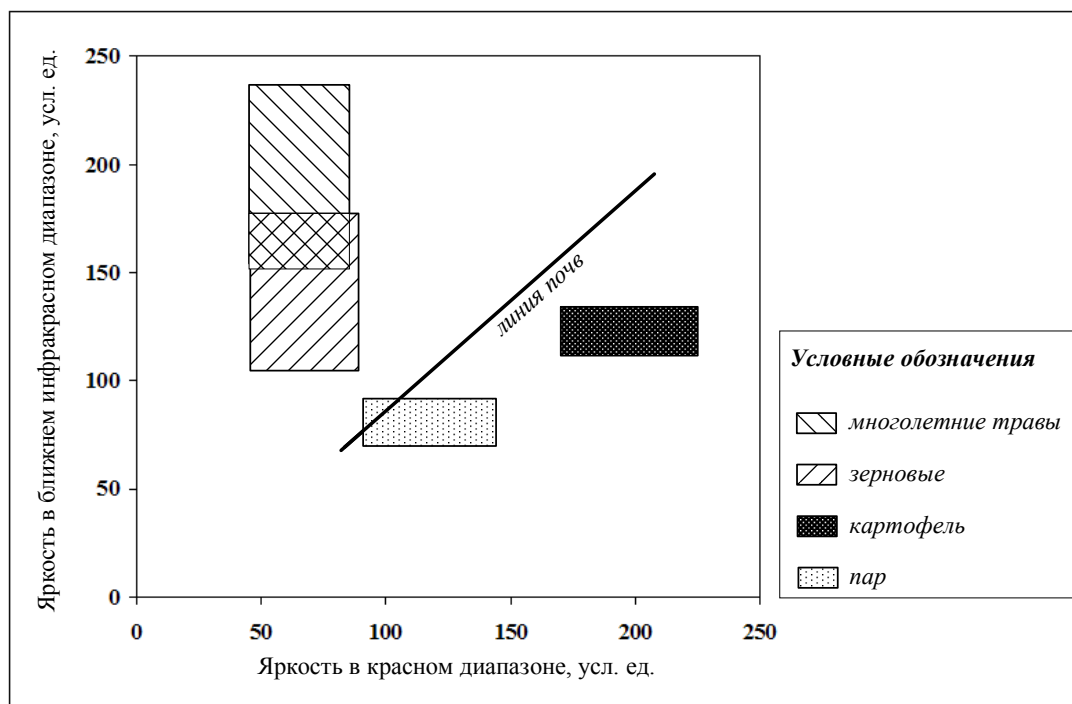


Рис. 3. Распределение полей с различными сельскохозяйственными культурами в пространстве спектральных признаков, полученное по данным одного снимка

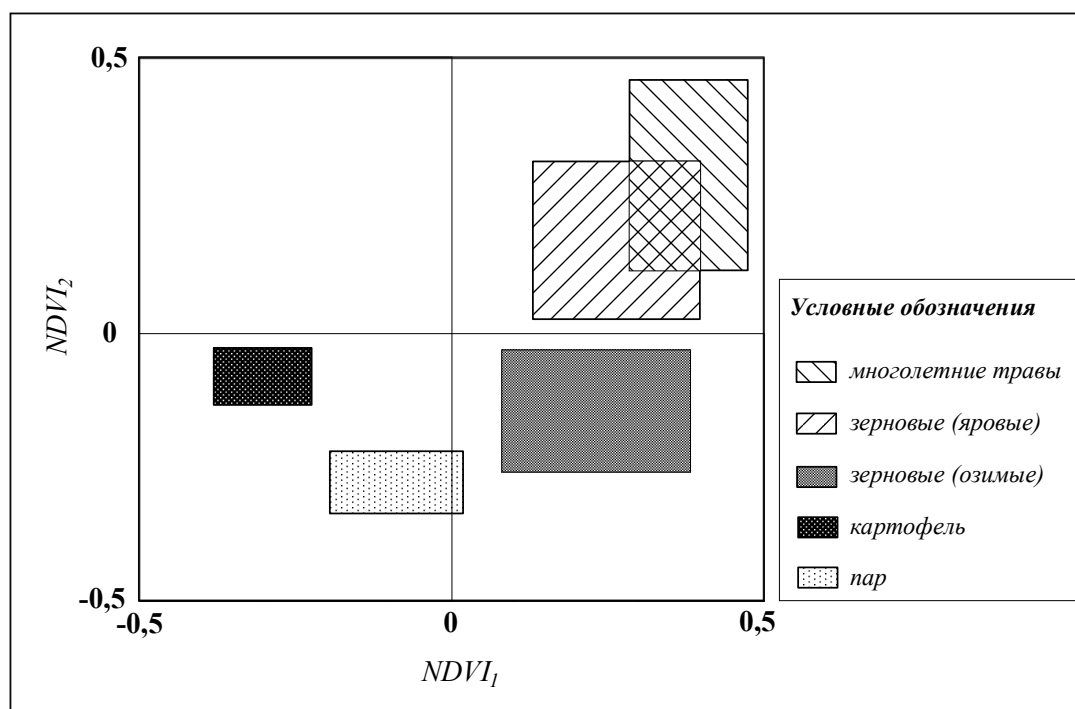


Рис. 4. Распределение полей с различными сельскохозяйственными культурами, полученное по значениям нормализованного вегетационного индекса по данным двух разновременных снимков

Таким образом, для более качественного и детального разделения сельскохозяйственных культур по видовому составу необходимо учитывать условия фазового развития растений. Учет заключается в анализе динамики развития культур по серии снимков, получаемых в течение вегетационного периода. Кроме того, необходим подбор оптимального способа идентификации.

Для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур был проведен ряд подготовительных работ. В частности, для исследования возможности использования ДДЗЗ в расчете ожидаемых урожайностей нами были построены регрессионные зависимости значений фитомассы сельскохозяйственных растений и ожидаемой урожайности сельскохозяйственных культур от нормализованного вегетационного индекса. Входными данными для построения уравнений регрессии послужили результаты подспутниковых наблюдений на опытных полях и карты *NDVI*. При подспутниковых обследованиях получали следующие показатели: урожайность зеленой массы, сбор сухой массы, густота всходов и стояния растений, фенологические наблюдения, высота растений. Перед уборкой по показателям зерновых культур определялась структура урожая и биологическая урожайность зерна. Показатели рассчитывались по результатам отбора проб на опытных полях. Данные дистанционного зондирования применялись для вычисления вегетационного индекса, т.е. для создания карты *NDVI* (значения близкие к максимальным за вегетационный период).

Уравнения регрессии для получения прогноза урожайности были построены следующим образом. На карту *NDVI* накладывались точки отбора проб. После этого в данных точках определялись значения индекса как в пикселях, соответствующих местоположению точек отбора проб, так и в соседних пикселях. Далее находились средние значения *NDVI* для каждой точки. Данные о структуре урожая с опытных полей и средние значения вегетационного индекса, полученные в точках отбора, подвергались статистической обработке. В результате были построены три уравнения регрессии в зависимости от типа сельскохозяйственных культур для расчета:

1) урожайности зеленой массы кормовых культур (козлятник, люцерна, викоовсяная смесь):

$$Y=40,96 \text{ } NDVI+1,53;$$

2) биологической урожайности яровых зерновых (пшеница, овес, ячмень):

$$Y=4,66 \text{ } NDVI+0,17;$$

3) биологической урожайности озимых зерновых (рожь, пшеница):

$$Y=4,29 \text{ } NDVI+1,94.$$

В этих уравнениях урожайность измеряется в тоннах с гектара.

Таким образом, данные дистанционного зондирования позволяют идентифицировать вид растительности, выделяя пары, картофель, посадки многолетних трав и зерновых культур, оценивать условия вегетации сельскохозяйственных культур, оперативно выявлять очаги угнетения растительности и оценивать масштаб наступления неблагоприятных явлений, а также на основе регрессионных зависимостей прогнозировать урожайность основных культур (Связев и др., 2008; <http://www.agromap.perm.ru>).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-05-99027-р_офи).

Библиографический список

- Голубятников Л.Л. Взаимосвязь вегетационного индекса с климатическими параметрами и структурными характеристиками растительного покрова / Л.Л. Голубятников, Е.А. Денисенко // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 4. С. 524–538.
- Книжников Ю.Ф. Аэрокосмические методы географических исследований. / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова, О.В. Тутубалина. М.: Академия, 2004. 336 с.
- Связев Е.М. Геоинформационная система космического мониторинга сельскохозяйственных угодий Пермского края / Е. М. Связев, С.В. Пьянков, И.Б. Некрасов, А.А. Смирнова, Д.В. Онегов, В.С. Русаков, П.К. Тимофеев, М.А. Шпаков // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: сб. науч. тр. Пермь, 2008. С. 52–56.
- Щербенко Е.В. Обнаружение засухи по данным космических съемок / Е.В. Щербенко, М.А. Шорохова, Н.М. Дронин, Ю.А. Скабелкин // ArcReview. Современные геоинформационные технологии. М.: Дата+, 2004. № 2. С. 8–9.

Поступила в редакцию 04.06.2009

Monitoring of conditions of agricultural crops in the Perm Krai on information of the remote sensing of Earth

S.V. P'yankov, N.A. Kalinin, E.M. Sviyazov, A.A. Smirnova, I.B. Nekrasov

Agricultural production management, especially in the areas unsuitable for arable farming, must be carried out according to the following principles - constant control of land treatment measures based on agricultural and

agrochemical engineering, phase crop development, control of crop yield and total yield. Remote (satellite) sensing can help to obtain objective regional level data on crops conditions over vast territories. The use of the data significantly reduces expenses on cultivated land monitoring over vast areas. Considering spatial nature of the abovementioned tasks geoinformation systems (GIS) are the most suitable tool for conducting research in this sphere. In GIS Centre of Perm State University method of complex evaluation of crop biomass, which is aimed at prompt analysis of seeds and their growing conditions, has been developed. This method is based on geoinformation system ArcGIS 9.* (ESRI, USA). The underlying principle of the method is that data obtained from Earth remote sensing, subsatellite monitoring and biological productivity model is used for crops conditions monitoring in diagnostic areas. In order to carry out complex evaluation, geographical database of diagnostic areas has been created. Then on the basis of remote sensing data information about overall conditions, growing conditions and predicted crop productivity has been obtained. What is more, the results have been supported by the middle- and high-resolution space photographs taken from the satellites Terra, Landsat, IRS. To see the connection between the space photographs and actual plants conditions verificatory measurements of crop biomass on the diagnostic areas have been conducted.