

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В СИСТЕМАХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

В настоящее время методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко применяются для решения самых разнообразных задач, в том числе и для оценки состояния растительного покрова (РП). Дистанционное зондирование РП позволяет оценивать динамику развития и состояние РП с различной степенью генерализации представляемой информации: от глобальных исследований в масштабах стран, регионов и континентов до небольших участков растительности. Одним из современных направлений применения данных ДЗЗ и передовых информационных технологий является точное земледелие (ТЗ), при ведении которого оценка состояния и продуктивности культурных растений проводится в пределах отдельно взятого сельскохозяйственного поля.

В настоящей статье даются только наиболее общие представления о ТЗ, а также о месте и роли ДЗЗ в системах точного земледелия.

### **ЧТО ТАКОЕ «ТОЧНОЕ ЗЕМЛЕДЕЛИЕ»?**

Прежде чем обсудить роль и место ДЗЗ в системах ТЗ, очевидно, необходимо ответить на вопрос: что означает этот термин – «точное земледелие»? В англоязычной научной литературе встречается большое количество вариантов для обозначения этого понятия. Прямой перевод таких терминов, как «Precision Farming», «Farming by Soil», «Soil-Specific Crop Management», «Site-Specific Management for Agricultural Systems», «High-tech sustainable agriculture», «Farming by satellites», «Spatially prescriptive farming», «Precision Crop Management» и т.д., не всегда отражает всей сути этой современной технологии.

Существует такое определение: «точное земледелие» – это использование разнородных данных (результатов анализа отобранных проб почв с их географической привязкой, результатов тематической интерпретации данных ДЗЗ, цифровых тематических карт и т.д.) с целью оптимизации принятия решений про локальное внесение удобрений и средств защиты растений для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства. С нашей точки зрения такое определение недостаточно четко передает суть этого понятия. Здесь и далее под термином «точное земледелие» мы понимаем комплексную высокотехнологичную систему сельскохозяйственного менеджмента, включающую в себя технологии глобального позиционирования (GPS), географические информационные системы

(GIS), технологии оценки урожайности (Yield Monitor Technologies), технологию переменного нормирования (Variable Rate Technology) и технологии ДЗЗ.

Основные результаты, достигаемые посредством применения технологий ТЗ:

- оптимизация использования расходных материалов (минимизация затрат);
- повышение урожайности и качества сельхозпродукции;
- минимизация негативного влияния сельскохозяйственного производства на окружающую природную среду;

• повышение качества земель;

• информационная поддержка сельскохозяйственного менеджмента.

Основными компонентами системы ТЗ являются:

• система сбора пространственной информации (ДЗЗ, наземные аналитические методы); система пространственного контроля выполнения операций: GPS; управляемые компьютером сельскохозяйственные машины и механизмы;

- система картирования и тематической интерпретации данных: GIS;
- система оценки влияния агропрактики на состояние окружающей среды;
- системы оценки агрономической и экономической эффективности выполненных технологических операций. Реализация технологии ТЗ осуществляется в несколько этапов. Первый этап - сбор и накопление пространственных данных. Именно на этом этапе широко используются данные ДЗЗ, полевые датчики контроля состояния растительности, а также проводится отбор и анализ почвенных образцов. На этом этапе с использованием GPS и GIS-технологий осуществляется создание баз данных.

Второй этап - анализ и тематическая интерпретация пространственной информации. На этом этапе составляются разнообразные картографические материалы по каждому полю в пределах данного хозяйства, а также принимаются решения о выполнении агротехнологических операций.

Третий этап - непосредственное выполнения агротехнологических операций, например, дозирование норм высева семян, применяемых удобрений или средств защиты растений, и коррекция агрономического календаря. На этом этапе применяется технология переменного нормирования.

Четвертый этап - оценка и картирование пространственного распределения урожайности в пределах одного поля. Сбор фактической информации для такого картирования производится во время уборки урожая с помощью установленных непосредственно на комбайне датчиков, сбор прогностической информации может осуществляться в определенные фазы развития растений с помощью данных ДЗЗ.

Пятый этап - оценка эффективности применения технологии ТЗ, которая включает в себя три главных аспекта: агрономический (повышение урожайности), экономический (минимизация затрат) и экологический (минимизация влияния применяемой агропрактики на состояние природной среды).

Последовательность реализации технологии ТЗ в упрощенном виде представлена на Рис. 1.

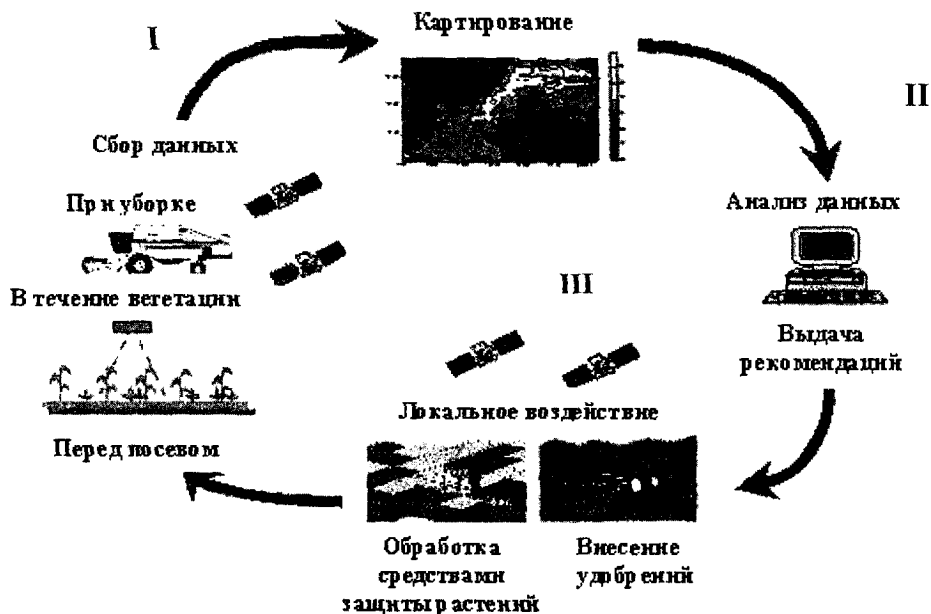


Рис.1. Последовательность реализации технологии точного земледелия (этапы 4 и 5 не показаны)

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ УРОЖАЯ И ПРИЧИНЫ ЕЕ ВЫЗЫВАЮЩИЕ

До сравнительно недавнего времени урожайность агрокультур определяли как среднюю величину для отдельного поля. В действительности же в пределах практически каждого поля она неодинакова для различных его участков. С осознанием этого факта и началось интенсивное развитие технологий ТЗ. Физиологическое состояние отдельного растения и растительного сообщества (агроценоза) в целом в значительной мере определяется влиянием целого ряда факторов, которые и определяют вариабельность урожая в пределах поля. (Табл.1)

Таблица 1.

## Причины variability урожая

|  |   |
|--|---|
| Погодные факторы                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• частота и количество выпавших осадков</li> <li>• солнечная радиация</li> <li>• температура</li> </ul>  |
| Почвенные факторы                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• механический состав, структура и плотность почв</li> <li>• подородие (гумусность)</li> <li>• дренирование</li> <li>• доступность элементов питания</li> <li>• катионообменная способность</li> <li>• рН</li> </ul>   |
| Факторы обусловленные сельскохозяйственной практикой | <ul style="list-style-type: none"> <li>• потенциал исходного посевного материала</li> <li>• соблюдение нормы высева</li> <li>• равномерность развития и созревания</li> <li>• севообороты</li> <li>• виды обработки почвы</li> <li>• предыдущая практика</li> <li>• недостаточный полив</li> <li>• недостаточное внесение средств защиты растений</li> <li>• недостаток основных элементов питания и микроэлементов</li> <li>• «огрехи» связанные с неисправностью сельхозтехники</li> <li>• нарушение сроков выполнения агроприемов</li> </ul> |
| Географические факторы                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• уклон</li> <li>• положение по отношению сторон света</li> </ul>  |
| Биологические факторы                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• поражение вредителями (насекомыми, грызунами)</li> <li>• угнетение сорняками</li> <li>• заболевания различной этиологии (вирусные, грибковые)</li> </ul>   |

Воздействие вышеперечисленных факторов (зачастую комплексное) приводит к возникновению физиологических и морфологических изменений как у отдельно взятого растения (микроуровень), так и у растительного сообщества в целом (макроуровень).

На микроуровне растения реагируют изменением количественного и качественного содержания пигментов, структуры мезофилла, а также изменениями свойств поверхности листьев и влагосодержания в них. Такая реакция всегда находит свое отражение в изменении спектрального отклика растительности и становится особенно очевидной если растения переведены в стрессовое состояние.

На макроуровне основными параметрами, формирующими спектральный отклик растительности и наиболее подверженными влиянию стрессовых факторов, являются биомасса и архитектура РП. Нарушение физиологических процессов на микроуровне, проявляющееся в ингибировании процессов пигментобразования и снижении фотосинтетической активности хлорофилла, приводит к замедлению ростовых процессов и, как следствие, к уменьшению биомассы. Для агроценозов это выражается, в конечном счете, в снижении их продуктивности. Все перечисленные изменения неизбежно проявляются в нарушениях архитектуры РП: изменении степени проективного покрытия почвы растениями, преимущественных углов ориентации фитоэлементов, уменьшении листового индекса. Под воздействием совокупности указанных процессов происходит существенное изменение спектральных характеристик отраженного растительным сообществом светового потока, что лежит в основе применения методов ДЗЗ для оценки состояния и продуктивности растительности.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ДЗЗ В СИСТЕМЕ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

подавляющее большинство используемых в настоящее время методов ДЗЗ основано на регистрации изменений параметров электромагнитного излучения, возникающих при его взаимодействии с объектом исследования. Взаимодействие электромагнитного излучения с таким объектом, как РП имеет достаточно сложный характер. Поскольку при этом можно выделить не только отраженный, но и поглощенный и прошедший через растительный слой потоки лучистой энергии, то объектом исследования является скорее система «почва-растительность». Согласно современным представлениям [1-3] свойства электромагнитного излучения, отраженного (или переизлученного) от такой системы, определяются в основном пятью факторами:

- оптическими свойствами листьев и других фитоэлементов растений, которые изменяются в течение вегетационного периода и существенно образом зависят от параметров окружающей среды;
- структурой (архитектоникой) РП, которая является видоспецифичным фактором и также переменна во времени. (густота стояния растений, площадь листовой поверхности, преимущественная ориентация листьев, степень проективного покрытия почвы растениями);

- отражательной способностью почвы, которая зависит от типа почвы (гранулометрический состав, содержание гумуса), ее влажности, наличия на поверхности почвы мульчирующего слоя (растительных остатков), степени и вида обработки (для сельскохозяйственных земель) и других факторов;

- условиями съемки, такими как длина оптического пути (высота съемки, надирная или боковая съемка), соотношение прямой и рассеянной радиации, азимут визирования по Солнцу, направление рядков (для культурной растительности);

- состоянием атмосферы, которое определяет характер рассеяния излучения (Ми, Рэлея или неселективное рассеяние), что обусловлено наличием и размерами присутствующих в атмосфере частиц (молекулы газов, пылевые частицы, аэрозоли, капли воды и т.д.).

Каждый из указанных факторов оказывает преимущественное влияние на ту или иную характеристику отраженного от системы «почва-растительность» светового потока. Так отражение от фитоэлементов и от почвы обуславливает спектральное распределение интенсивности отраженного сигнала, а архитектоника и условия освещения – пространственное [4-5].

Следует отметить, что изменения параметров отражения РП, вызванные различными факторами (недостатком или избытком элементов питания, загрязнением почвы токсикантами, водным дефицитом или заболеванием растений), зачастую имеют сходный характер. Это усложняет задачу идентификации типа стресса только на основе спектральных измерений и требует проведения на участках съемок дополнительных ботанических, биофизических и биохимических исследований [6].

Для того, чтобы определить насколько данные ДЗЗ могут помочь в реализации ТЗ и насколько экономически оправдано их применение необходимо ответить на несколько вопросов. Первый, и принципиальный вопрос - возможно ли вообще решить интересующую потребителя проблему с помощью средств и методов ДЗЗ? При этом необходимо понимать, что информация, получаемая дистанционными методами, как и любая другая информация, характеризуется той или иной степенью детальности и достоверности. Каким образом получаемая информация будет интегрирована в базы данных для последующей обработки и анализа? С какой периодичностью потребителю необходимо получать данные ДЗЗ и насколько быстро после проведения обследования территории она должна быть предоставлена?

В настоящее время основным источником информации о состоянии растительного покрова, являются сенсорные системы авиационного и космического базирования. Из последних наиболее широко используется информация со спутников, перечисленных в Табл. 2.

Таблица 2

Спутниковые системы высокого пространственного разрешения

| Спутник<br>Страна                        | Основные характеристики космоснимков |   |
|--|--------------------------------------|---|
| SPOT-5<br>CNES<br>Франция                | Панхроматический:                    | размер пиксела – 5 м<br>полоса обзора - 120 км      |
|  | Спектрозональный:                    | размер пиксела - 10, 20 м<br>полоса обзора - 120 км |
|  | VEGETATION:                          | размер пиксела - 1 км<br>полоса обзора - 2200 км    |
| ORBVIEW-3<br>Orbital Science Inc.<br>США | Панхроматический:                    | размер пиксела – 1 или 2 м<br>полоса обзора - 8 км  |
|  | Спектрозональный:                    | размер пиксела - 8 м<br>полоса обзора - 8 км        |
| QUICK BIRD<br>Earthwatch Inc.<br>США     | Панхроматический:                    | размер пиксела – 1 или 2 м<br>полоса обзора - 36 км |
|  | Спектрозональный:                    | размер пиксела - 4 м<br>полоса обзора - 36 км       |
| RESOURCESAT-1<br>ISRO<br>Индия           | Спектрозональный (LISS-IV):          | размер пиксела - 6 м<br>полоса обзора - 25 км       |
|  | Спектрозональный (LISS-III):         | размер пиксела - 23 м<br>полоса обзора - 140 км     |
|  | Спектрозональный (AwiFS):            | размер пиксела - 60 м<br>полоса обзора - 740 км     |
| CARTOSAT-1<br>ISRO<br>Индия              | Панхроматический (стерео):           | размер пиксела – 2,5 м<br>полоса обзора - 30 км     |
| CARTOSAT-2<br>ISRO<br>Индия              | Панхроматический:                    | размер пиксела – 1 м<br>полоса обзора - 12 км       |

Для успешного применения в ГЗ системы дистанционного зондирования должны отвечать следующим условиям [7]:

1. возможность осуществления сбора данных, их коррекции и первичной обработки в течение 24-48 часов;
2. невысокая (доступная) стоимость данных;

3. высокое пространственное решение (порядка 5 м для спектральной съемки);
4. высокое спектральное решение (порядка 10-20 нм) для повышения точности определения биофизических параметров растительного покрова;
5. высокое временное решение, обеспечивающее, по крайней мере, 5-6 сеансов получения информации в течение вегетационного периода;
6. возможность предоставления результатов тематической интерпретации данных в доступных пользователю форматах.

Существует несколько подходов в использовании данных ДЗЗ для нужд ТЗ. Первый из них заключается в использовании данных ДЗЗ только для обнаружения и локализации участков аномального развития (угнетенного состояния) растительности в пределах одного поля. Такие аномалии могут быть вызваны самыми разными факторами: поражением растений вредителями, угнетением их сорной растительностью, недостатком основных элементов питания, водным стрессом растений и т.д.

Второй подход основан на обнаружении количественных связей между биофизическими параметрами состояния растительности и изменениями спектрального отклика РП, обусловленными влиянием факторов внешней среды или применяемыми агротехнологиями.

Третий подход заключается в интеграции некоторых биофизических параметров растительного покрова (биомасса, проективное покрытие, листовой индекс) или параметров радиационного режима растительности (эвапотранспирация, доля физиологически активной радиации), которые могут быть оценены по данным ДЗЗ с математическими и физиологическими моделями оценки продуктивности РП для использования в системе поддержки принятия решений в рамках применяемых технологий ТЗ [8].

### **БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ**

В настоящее время применение данных ДЗЗ для решения практических сельскохозяйственных задач находится еще только в начальной фазе своего коммерческого использования. Это связано, прежде всего, с достаточно высокой стоимостью данных ДЗЗ и некоторыми ограничениями технического характера. Есть все основания полагать, что по мере появления спутниковых систем нового поколения (с более высоким пространственным и временным разрешением) и с выходом все большего количества компаний на рынок предоставления услуг ДЗЗ, ситуация на рынке технологий ТЗ будет меняться в сторону все более широкого их применения.



---

*Список литературы*

1. Кондратьев К.Я., Федченко П.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности, Л.: Гидрометеиздат, 1982, - 216 с.
2. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П. Аэрокосмические исследования почв и растительности, Л.: Гидрометеиздат, 1986, - 229 с.
3. Рачулик В.И., Ситникова М.В. Методологические и экспериментальные основы использования оптических свойств почвенно-растительных объектов при определении параметров растительности // Применение методов дистанционной диагностики в сельском хозяйстве, Киев: Наукова Думка, 1989, - С. 33-40.
4. Gates D.M., Keegan H.J., Schleter J.S., Weidner V.R. Spectral properties of plants // Appl. Optics, 1965, v.4, № 1, PP. 11-20.
5. Wooley J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves // Plant Physiology, 1971, v.47, № 5, PP. 656-662.
6. Кочубей С.М., Кобец Н.Н., Шадчина Т.М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. - Киев: Наукова думка, 1990, - 135 с.
7. Barnes, E.M., Moran, M.S., Pinter, P.J. Jr and Clark, T.R. 1996. Multispectral remote sensing and site-specific agriculture: examples of current technology and future possibilities. Published in Proc. of 3rd Int. Conf. on Precision Agriculture, June 23-26, 1996, Minneapolis, Minnesota, ASA. pp.843-854.
8. Moran, M.S., Inoue, Y. and Barnes, E.M. 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. Remote Sensing of Environment. 61: 319-346.)