

**А.С. Черепанов** (Компания «Совзонд»)

В 2005 г. окончил Курганский государственный университет, в 2008 г. — аспирантуру МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности «картография». С 2006 г. работает в компании «Совзонд», в настоящее время — старший инженер по тематической обработке данных ДЗЗ. Кандидат географических наук.

**Е.Г. Дружинина** (PE INTERNATIONAL, Германия)

В 2005 г. окончила Международный университет природы, общества и человека «Дубна», в 2005-2007 гг. работала в компании «Совзонд». В 2009 г. окончила магистратуру Университета Калифорнии (США) по специальности «Науки о Земле и менеджмент». В настоящее время работает в компании PE INTERNATIONAL (Германия) специалистом по консалтингу по вопросам окружающей среды.

## Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Знания о связи структуры и состояния растительности с ее спектрально отражательными способностями позволяют использовать аэрокосмические снимки для картографирования и идентификации типов растительности и их стрессового состояния.

Для работы со спектральной информацией часто прибегают к созданию так называемых «индексных» изображений. На основе комбинации значений яркости в определенных каналах, информативных для выделения исследуемого объекта, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. Спектральные индексы, используемые для изучения и оценки состояния растительности, получили общепринятое название вегетационных индексов.

В настоящее время существует около 160 вариантов вегетационных индексов. Они подбираются экспериментально (эмпирическим путем), исходя из известных особенностей кривых спектральной отражательной способности растительности и почв.

Расчет большей части вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках кривой спектральной отражательной способности растений (рис. 1). На красную зону

спектра (0,62-0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75-1,3 мкм) максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. Т. е. высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с большой фитомассой растительности) ведет к более низким значениям коэффициентов отражения в красной зоне спектра и большим значениям в ближней инфракрасной. Как это хорошо известно, отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов.

При обработке космических снимков в программном комплексе ENVI с помощью инструмента Band Math могут быть рассчитаны любые спектральные индексы. Кроме того, имеется специальный калькулятор вегетационных индексов ENVI (калькулятор VI ENVI), который позволяет рассчитать 27 вегетационных индексов, используемых для оценки состояния растительности, содержания пигментов, азота, углерода, воды. Формулы, по которым рассчитываются индексы из калькулятора VI ENVI, описаны в ENVI Help, поэтому здесь мы не будем их дублировать. При выборе снимка в калькуляторе VI ENVI программа предложит список индексов, которые можно рассчитать для данного набора спектральных зон. Например, по снимкам, где есть только красная и ближняя инфракрасная спектральные зоны, программа предложит рассчитать два индекса — NDMI и RVI. При работе с гиперспектральным снимком будет предложен расчет всех 27 индексов.

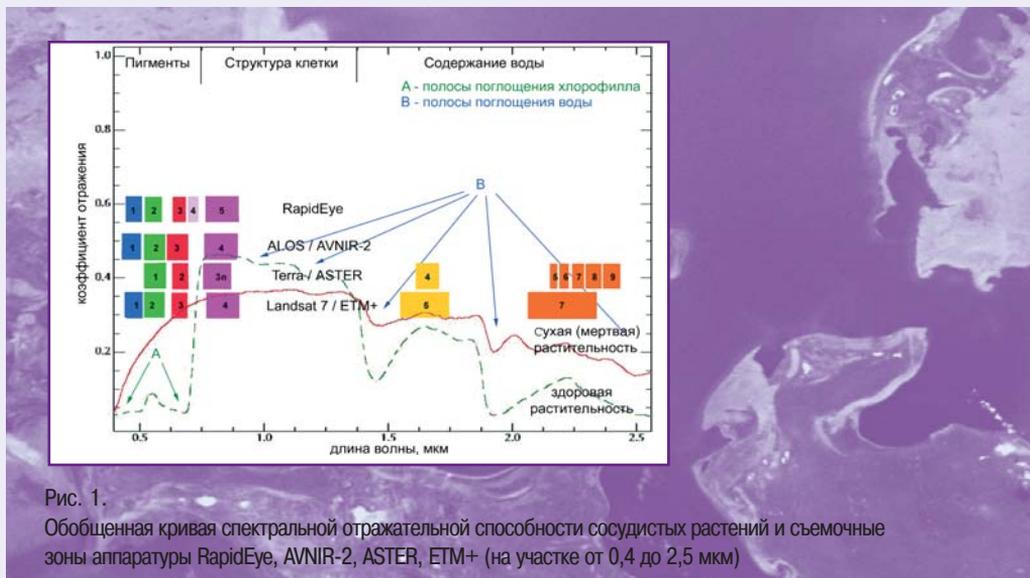


Рис. 1.

Обобщенная кривая спектральной отражательной способности сосудистых растений и съемочные зоны аппаратуры RapidEye, AVNIR-2, ASTER, ETM+ (на участке от 0,4 до 2,5 мкм)

Индексы сгруппированы в категории по свойству растительности, которое они характеризуют:

- **Broadband Greenness** (5 индексов): индексы «зелености», рассчитываемые по данным в широких спектральных зонах;
  - **Narrowband Greenness** (7 индексов): индексы «зелености», рассчитываемые по данным в узких спектральных зонах;
  - **Light Use Efficiency** (3 индекса): индексы эффективности использования света;
  - **Canopy Nitrogen** (1 индекс): индекс содержания азота в растительном покрове;
  - **Dry or Senescent Carbon** (3 индекса): индексы содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы;
  - **Leaf Pigments** (4 индекса): индексы содержания пигментов – каротиноиды и антоцианины;
  - **Canopy Water Content** (4 индекса): индексы для оценки содержания влаги в растительном покрове.
- Рассмотрим особенности каждой группы вегетационных индексов.

### Broadband Greenness

Индексы этой группы отражают общее количество растительности и используются для оценки ее состояния при решении широкого круга задач. Они суммируют и отражают влияние таких факторов, как содержа-

ние хлорофилла, площадь листовой поверхности, сомкнутость и структура растительного покрова. Вегетационные индексы этой группы хорошо коррелируют с индексом фотосинтетически активной радиации (fAPAR) и индексом листовой поверхности (LAI).

Их можно использовать при работе с любыми мультиспектральными аэрокосмическими снимками высокого, среднего или низкого разрешения, у которых есть спектральные каналы в красной (0,60-0,75 мкм) и ближней инфракрасной (0,75-1,3 мкм) зонах.

Основное назначение этих индексов – картирование растительного покрова, выявление площадей покрытых и непокрытых растительностью, оценка и мониторинг состояния растительного покрова, оценка продуктивности и урожайности.

### Narrowband Greenness

Индексы этой группы также отражают общее количество и состояние растительности. Все, сказанное для предыдущей группы индексов (Broadband Greenness), справедливо и здесь. Отличие в том, что для расчетов этих индексов используются значения коэффициентов отражения на участке спектра от 0,690 до 0,750 мкм, т. е. рассматривается область ближнего инфракрасного склона спектральной кривой растительности (red edge).

Использование значений коэффициентов отражения в узких спектральных зонах позволяет с помощью индексов фиксировать даже небольшие изменения состояния растительности. Расчет индексов возможен только по гиперспектральным аэрокосмическим снимкам.

### Light Use Efficiency

Индексы этой группы отражают эффективность, с которой растительность способна использовать поступающий свет для фотосинтеза. Они хорошо коррелируют с эффективностью усвоения углерода и с активностью роста, а также тесно связаны с поглощением фотосинтетически активной радиации.

Вегетационные индексы учитывают соотношение между различными типами пигментов для оценки общей эффективности использования света.

Индексы помогают оценить рост и продуктивность растений, что актуально при решении сельскохозяйственных задач.

### Canopy Nitrogen

Этот индекс отражает концентрацию азота в растительном покрове. Азот входит в состав белков, хлорофилла и многих других органических соединений. Высокие концентрации обычно наблюдаются в быстрорастущей растительности. При азотном голодании листья приобретают бледно-зеленую окраску, мельчают, уменьшается ветвление побегов. При избытке азота усиливается рост, ткани образуются рыхлые, цветение задерживается. Вегетационные индексы, чувствительные к хлорофиллу, часто одновременно отражают содержание азота. Для расчета относительного содержания азота в растительном покрове используется средний инфракрасный диапазон (SWIR).

### Dry or Senescent Carbon

Эти индексы разработаны для учета общего количества «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы. Такой углерод в больших количествах присутствует в древесине и в мертвых или сухих растительных тканях. Увеличение этих показателей может отражать процесс «старения» и отмирания растений. Для расчета относительного содержания азота в растительном покрове используется средний инфракрасный диапазон (SWIR). Эти индексы широко используются при оценке пожарной опасности на территории.

### Leaf Pigments

Индексы этой группы оценивают пигменты, характерные для растений в состоянии стресса. К ним относятся каротиноиды и антоцианины, которые наблюдаются в значительных количествах у угнетенной растительности. Индексы не учитывают хлорофилл, так как он измеряется с использованием индексов «зелености». Областями применения индексов Leaf Pigments является сельское хозяйство (мониторинг состояния полей и оценка урожайности), а также выявление участков растительного покрова, находящихся в стрессовом состоянии.

Часто индексы могут показать стрессовое состояние растительности еще до того, как оно будет заметно «невооруженным глазом». Для их расчета используются данные в узких спектральных зонах видимого диапазона.

### Canopy Water Content

Эти индексы разработаны для оценки содержания влаги в растительном покрове. Содержание воды – важный показатель, высокое содержание влаги характерно для здоровой растительности, которая быстрее растет и более устойчива к пожарам. Для расчетов индексов используется ближний и средний инфракрасный диапазоны. Индексы широко применяются при оценке пожарной опасности на территории вместе с индексами группы Dry or Senescent Carbon.

Каждая из перечисленных групп индексов предназначена для оценки какого-либо из свойств растительного покрова и содержит несколько индексов. Для конкретных природных условий и различных задач одни индексы из группы могут дать более точные результаты, чем другие. Сравнивая результаты расчетов индексов с полевыми данными, можно выбрать индекс, максимально точно отражающий исследуемое свойство. Таким образом существенно повышается точность результатов при последующей обработке.

### ИНДЕКС NDVI

Расчет наиболее популярного и часто используемого индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) дополнительно вынесен в отдельный инструмент ENVI. NDVI – нормализованный разностный индекс растительности был впервые описан Rouse V.J. в 1973 г. –



Рис. 2.  
Исходный снимок с QuickBird

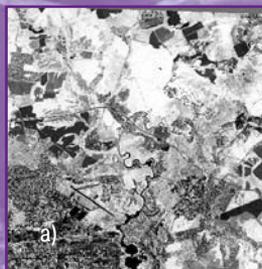


Рис. 3.  
Результат расчета индекса NDVI:  
а) индексное изображение в полутоновом варианте;  
б) индексное изображение, раскрашенное в псевдоцвета

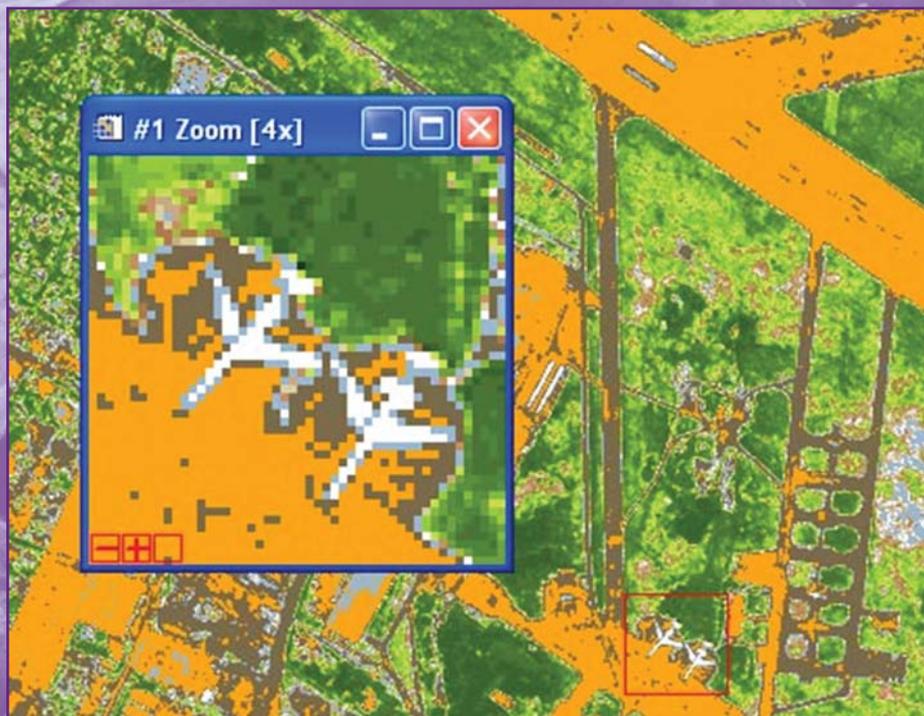


Рис. 4  
Увеличенный фрагмент индексного изображения, раскрашенного в псевдоцвета

простой количественный показатель количества фитомассы. Говоря вегетационный индекс, часто подразумевают именно его.

Индекс вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{\rho_{БИК} - \rho_{КР}}{\rho_{БИК} + \rho_{КР}},$$

где  $\rho_{КР}$  – коэффициент отражения в красной спектральной зоне,  $\rho_{БИК}$  – коэффициент отражения в ближней инфракрасной спектральной зоне.

Для растительности индекс NDVI принимает положительные значения, и чем больше зеленая фитомасса, тем они выше. На значения индекса влияет также видовой состав растительности, ее сомкнутость, состояние, экспозиция и угол наклона поверхности, цвет почвы под разреженной растительностью. Индекс умеренно чувствителен к изменениям почвенного фона, кроме случаев, когда густота растительного покрова ниже 30%. Индекс может принимать значения от -1 до 1. Для зеленой растительности индекс обычно принимает значения от 0,2 до 0,8.

Приведем примеры расчета индекса NDVI, наглядно показывающие его информативность. В качестве исходных данных был взят снимок со спутника QuickBird на район Казани (рис. 2).

Полученное индексное изображение (рис. 3а) можно «раскрасить». Существует стандартизированная шкала NDVI, она используется достаточно редко. В данном

случае собственная шкала дала более наглядный результат (рис. 3б).

Оранжевый цвет характерен для дорог, строений и других искусственных объектов, коричневый – для открытых почв, голубой – для воды, а различные оттенки зеленого – для растительности. Обратите внимание, как четко видны самолеты (рис. 4).

Открытая почва по NDVI занимает промежуточное положение между растительностью / не растительностью и водой. Часто участки открытой почвы отражаются как вода или как искусственный материал, имеют значения индекса около 0 или даже <0 (рис. 5).

Главным преимуществом вегетационных индексов является легкость их получения и широкий диапазон решаемых с их помощью задач. Так, NDVI часто используется как один из инструментов при проведении более сложных типов анализа, результатом которых могут являться карты продуктивности лесов и сельскохозяйственных земель, карты ландшафтов и природных зон, почвенные, аридные, фито-гидрологические, фенологические и другие эколого-климатические карты. Также на его основе возможно получение численных данных для использования в расчетах оценки и прогнозирования урожайности и продуктивности, биологического разнообразия, степени нарушенности и ущерба от различных стихийных бедствий, техногенных аварий и т. д.

В заключение следует отметить, что любые вегетационные индексы не дают абсолютных количественных показателей

исследуемого свойства, и их значения зависят от характеристик сенсора (ширина спектральных каналов, разрешения), условий съемки, освещенности, состояния атмосферы. Они дают только относительные оценки свойств растительного покрова, которые могут быть интерпретированы и с привлечением полевых данных пересчитаны в абсолютные.



Рис. 5  
Отображение растительности и открытой почвы