Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега»

В.П. Саворский[1,2], А.В. Кашницкий[1], А.М. Константинова[1], И.В. Балашов[1], Ю.С. Крашенинникова[1], В.А. Толпин[1], С.М. Маклаков[2], Е.В. Савченко[2]

[1]Институт космических исследований,117997 Москва, Россия
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru
[2]Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл., Россия
E-mail: savor@inbox.ru

Основной целью работы является расширение функциональности средств информационных систем Созвездие-Вега за счет включения в их состав сервисов, ориентированных на исследование определенного вида (класса) природных объектов по их гиперспектральным индексам. Для достижения поставленной цели были созданы универсальные аналитические инструменты работы с гиперспектральными данными (ГСД). На первом этапе такими целевыми объектами были выбраны участки лесной и сельскохозяйственной растительности. Для описания указанных объектов был проведен анализ возможностей привлечения гиперспектральных индексов (ГСИ), надежно и достоверно описывающих их состояние. Выделенные в результате анализа для каждого из контролируемых объектов виды ГСИ были включены в состав информационных продуктов семейства «Созвездие-Вега» в качестве базовых наборов ГСИ. Наряду с этим сервисы семейства «Созвездие-Вега» предоставляют пользователям возможность формировать свои пользовательские наборы ГСИ, позволяющие уточнять оценки состояния объектов для выделенных природно-климатических условий наблюдения. Эффективность применения web-инструментов для анализа ГСИ подтверждена приведенными в работе примерами. В частности, эти инструменты наглядно показывают преимущества использования целевых индексов, например, DWSI5 для оценок эффективности орошения по сравнению с результатами использования для этих целей индекса NDVI.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, гиперспектральные данные, гиперспектральные индексы, «Созвездие-Вега»

Одобрена к печати: 09.06.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45

Введение

«Созвездие-Вега» (http://sozvezdie-vega.ru/) – это семейство информационных систем ИКИ РАН, ориентированных на создание на основе единой технологической платформы информационных сервисов, обеспечивающих возможность оперативной удаленной работы различных групп пользователей с данными спутниковых наблюдений для решения широкого круга научных и прикладных задач по исследованию биологических ресурсов. Эти информационные системы собирают спутниковую и другую географическую информацию из различных источников и обеспечивают глобальный доступ к ней. При этом обеспечивается работа с данными в режиме реального времени посредством взаимосвязанных динамических сервисов, функционирующих в распределенной среде и позволяющих находить пространственные данные по различным критериям и анализировать их с помощью инструментов web-браузера для решения широкого круга научных и прикладных задач. Подробно с возможностями различных информационных систем, входящих в семейство «Созвездие-Вега» можно познакомиться в работах (Лупян, Савин и др., 2011; Барталев и др., 2012; Лупян, Матвеев и др., 2012; Гордеев и др., 2014; Уваров и др., 2014; Кашницкий и др., 2015). Информационные системы семейства «Созвездие-Вега» построены и развиваются на концептуально новом подходе к развитию информационных систем и предоставляемых

ими сервисов. Прежде всего, это выражается в существенном изменении порядка предоставления данных пользователям.

Традиционные подходы предполагают сначала выбор необходимых наборов данных из архивов, создание их локальных копий у конкретного пользователя (исследователя), а потом проведение их обработки и анализа. Анализ, проведенный в работах (Лупян, Мазуров и др., 2011; Лупян, Саворский, 2012) показал, что такой путь в условиях лавинообразного нарастания объемов и номенклатуры спутниковых данных в настоящее время малоэффективен, а в ближайшем будущем, по-видимому, станет и нереализуемым. Для решения возникающих при этом проблем были предложены более эффективные подходы организации процессов работы с данными дистанционного мониторинга (Лупян, Саворский, 2012). На базе этих подходов были развиты и внедрены в состав информационных систем семейства «Созвездие-Вега» сервисы, предоставляющие возможности доступа к архивам спутниковых данных и результатам их обработки одновременно со средствами, обеспечивающими проведение их обработки и анализа. Это концептуальное решение реализовано в информационных системах семейства «Созвездие-Вега» в виде обеспечения доступа к архивам спутниковых данных и результатам их обработки одновременно с предоставлением web-интерфейсов управления инструментами обработки и анализа этих данных (Уваров и др., 2014; Кашницкий и др., 2015). Таким образом, существенно снижаются объемы обмена данными внутри распределенной системы, и тем самым создаются условия эффективной работы со сверхбольшими объемами данных.

Важно отметить, что «традиционные» сервисы и новые аналитические сервисы в составе систем семейства «Созвездие-Вега» составили цельную технологию работы с данными в рамках распределенных информационных систем (Кашницкий и др., 2015). Эта технология позволяет исследователям использовать распределенные информационные и вычислительные ресурсы с той же легкостью, что и локальные, и обеспечивает возможность эффективной работы со сверхбольшими распределенными архивами спутниковых данных и результатами их обработки. Важным качеством данной технологии является то, что она поддерживает анализ, в том числе одновременный, как мультиспектральных данных (МСД), так и гиперспектральных данных (ГСД) в виде многолетних рядов наблюдений по территории России за период с 2000 года по настоящее время (Лупян, Савин и др., 2011; Барталев и др., 2012; Лупян, Матвеев и др., 2012; Гордеев и др., 2014; Уваров и др., 2014; Кашницкий и др., 2015).

Наряду с инструментами общего назначения в составе сервисов семейства «Созвездие-Вега» разработаны инструменты работы с ГСД (Уваров и др., 2014). Эти инструменты дают возможность анализировать спектральные особенности природных объектов по результатам гиперспектральных наблюдений. Прежде всего, это возможность цветовой коррекции, которая позволяет настраивать передаточную функцию яркости для каждого из отображаемых спектральных каналов и, тем самым, визуализировать характерные особенности анализируемого объекта или явления. Кроме того, это возможность совместного анализа нескольких изображений как путем поочередного их вывода на экран, так и

построения синтезированного из них изображения. И, наконец, это возможность подробного анализа спектральных характеристик объектов благодаря функции построения спектральных профилей в заданной точке изображения.

Созданные универсальные аналитические инструменты для работы с ГСД позволяют анализировать спектры в различных точках и на различных объектах и проводить классификацию изображений различных территорий по данным большого числа спектральных каналов, как с обучением, так и без обучения (Уваров и др., 2014; Кашницкий и др., 2015). Однако эти универсальные инструменты не всегда обеспечивают достаточную устойчивость оценок и повторяемость результатов анализа данных спутникового дистанционного зондирования, что обусловлено, прежде всего, пространственно-временной изменчивостью оптических свойств атмосферы. Так, эта проблема актуальна при формировании долговременных однородных рядов результатов наблюдений. Как следствие, для обеспечения корректности результатов анализа исследователи вынуждены отбраковывать те наборы спутниковых данных, которые получены в условиях наблюдений, существенно отличающихся от принятых в качестве некоторого явного или неявного стандарта (среднего). В частности, при проведении мультиспектральных или гиперспектральных наблюдений в видимом и ИК диапазоне приходится отбраковывать данные не только при наличии облачности, но и в присутствии полупрозрачной дымки или аэрозоля. Такая отбраковка зачастую значительно снижает точность статистических оценок результатов ГСД ввиду малой повторяемости сеансов наблюдений одного и того же природного объекта и вытекающих из этого малых размеров выборок ГСД для этого объекта. Альтернативой тотальной отбраковке является использование таких диапазонов видимого спектра, которые минимально чувствительны к воздействию мешающих факторов, в частности, к изменению параметров прозрачности атмосферы.

Повышению точности оценок также способствует использование для исследования определенного класса объектов тех диапазонов спектра, которые наиболее чувствительны к изменениям состава, структуры и/или состояния исследуемых объектов. Максимальную чувствительность спектральных оценок к целевым параметрам контролируемых объектов при минимальной чувствительности к мешающим факторам можно реализовать на основе спектральных индексов (СИ) или, применительно к предмету данной статьи, гиперспектральных индексов (ГСИ). СИ и ГСИ, по определению, строятся таким образом, чтобы повысить устойчивость зависимостей измеряемых характеристик различных объектов к условиям наблюдений. В частности, спектральные вегетационные индексы используют характерные зависимости зеленой растительности путем комбинирования ее низкой отражательной способности в видимом диапазоне с высокой отражательной способностью в ближнем ИК диапазоне. Эти комбинации при наблюдении целевого объекта, по определению, должны минимизировать вариации регистрируемого излучения, вносимые внешними мешающими факторами, и максимизировать чувствительность к целевым переменным, характеризующим этот целевой объект (Daughtry et al., 2000). В работе (Dennison, Roberts, 2009) указанный минимаксный подход представлен в явном виде применительно

к определению оптимальных, в описанном выше смысле, значений гиперспектрального индекса для детектирования пожаров (HDFI) (см. ниже определение в *табл. 1*).

Основной целевой задачей работы, направленной на повышение точности и устойчивости оценок состояния природных объектов, является расширение функциональности информационных систем семейства «Созвездие-Вега» за счет включения в их состав инструментов, ориентированных на исследование определенного вида (класса) природных объектов по ГСИ. Такой подход основан на последовательном использовании набора спектральных индексов, определяемых по ГСД, для восстановления характеристик различного рода природных объектов. В настоящей работе мы проанализируем и опишем работу с ГСИ, ориентированными, в основном, на оценку различных характеристик растительного покрова, которые реализованы сейчас в сервисах семейства «Созвездие-Вега». В то же время отметим, что механизмы и инструменты, реализованные в настоящее время в этих сервисах, позволяют создавать и использовать ГСИ, ориентированные на исследование и других типов объектов.

Особенности гиперспектрального анализа

Гиперспектральные данные имеют, в принципе, большой потенциал для идентификации объектов на земной поверхности и для улучшения точности классификации параметров их состояния (Amigo et al., 2015). Но из-за их высокой размерности традиционные статистические методы классификации не могут быть напрямую применены к таким изображениям в часто наблюдаемом в практике гиперспектральных спутниковых наблюдений случае малых объемов обучающих выборок (Hsu, 2003; Huang, Hsu, 2012). Эта проблема известна как «проклятие размерности» (Bellman, 1961). Для ее решения обычно используются методы уменьшения (редукции) размерности двух типов, основанные, во-первых, на выборе признаков (feature selection) (James et al., 2013), а во-вторых – на извлечении признаков (feature extraction) (Guyon, Elisseeff, 2006). Выбор признаков – это процесс выбора из подмножества априори известных релевантных в заданном контексте признаков для использования их в построении моделей формирования гиперспектрального изображения (James et al., 2013). Извлечение признаков заключается в преобразовании множества исходных данных в набор признаков с существенно уменьшенной, по сравнению с исходным множеством данных, размерностью (Guyon, Elisseeff, 2006).

Изначально с появлением гиперспектральных средств наблюдения анализ ГСД производился с использованием так называемых спектральных библиотек (Clark et al., 2007; Smith, 2010; Boschetti et al., 2014). При таком подходе следует учитывать то, что использовать напрямую характеристики, хранимые в спектральных библиотеках, для получения полезной информации о большинстве объектов спутниковых наблюдений земной поверхности весьма затруднительно. Это связано с тем, что в этом случае необходимо учитывать и устранять влияние различного рода мешающих факторов, таких, как, например,

наличие облачности или дымки, плохую различимость объекта на окружающем его фоне, экранировку нижних ярусов растительности верхними и т.п. Перекрытие спектров отдельных объектов или компонентов наблюдаемого ландшафта также существенно затрудняет анализ и может привести к неверной интерпретации полученных данных. Важным фактором остается и сложность обработки большого количества спектров, а также необходимость привлечения больших вычислительных ресурсов (Darvishzadeh, 2008; Smith, 2010). В совокупности все эти обстоятельства значительно снижают эффективность использования спектральных библиотек при обработке ГСД, особенно при реализации процедур удаленного анализа ГСД.

Альтернативой прямому использованию спектральных библиотек является использование гиперспектральных индексов (ГСИ) либо их подмножества – нормализованных гиперспектральных индексов (НГСИ). Спектральные индексы – это представленные в виде алгебраических выражений (а зачастую и в виде простых рациональных дробей, см. *табл. 1* и *2*) комбинации коэффициентов отражения изучаемого объекта в двух и более диапазонах, которые отражают относительные значения целевых характеристик исследуемого объекта (http://www.exelisvis.com/docs/SpectralIndices.html). На основе комбинации значений яркости в определенных на основании физических либо эмпирических представлений о каналах, информативных для выделения исследуемого объекта и наименее подверженных влиянию мешающих факторов, и расчета по этим значениям «спектрального индекса» объекта строится индексное изображение, соответствующее значению индекса в каждом пикселе, что в конечном итоге и позволяет выделить исследуемый объект или оценить его состояние. В отличие от СИ, оцениваемых по МСД, т.е. по данным, измеренным в широких спектральных полосах 500÷1000 нм, ГСИ оцениваются по данным, измеренным в узких полосах 5÷10 нм, что дает возможность существенного расширения признакового ряда объектов дистанционных наблюдений за счет включения в этот ряд факторов, индицируемых исключительно в пределах узких полос.

ГСИ позволяют не только получить наглядный и информативный результат, но и за счет простоты их представлений обеспечивают массовую обработку данных, идентифицируя при этом искомый фактор объекта или процесса, запечатлённый в ГСД, с большой точностью и устойчивостью, поскольку ГСИ, при их корректном определении, являются, при прочих равных условиях, наиболее устойчивыми к воздействию внешних факторов соотношениями интенсивностей спектральных компонент в заданном классе выражений (Darvishzadeh, 2008). Вот почему ГСИ играют роль инвариантов, в оговоренных пределах характеризующих выбранный класс объектов независимо от условий съемки.

Для целей реализации инструментов удаленного анализа ГСД важно то, что при этом возможно обеспечить высокую эффективность алгоритмов оценки ГСИ, поскольку они используют данные малого количества гиперспектральных каналов. Как следствие, за счёт этого достигается высокая скорость обработки ГСД. Вместе с тем ГСИ легко адаптировать под пользовательские запросы, в том числе обеспечив их динамическую настройку непосредственно в процессе сессии удаленной работы с ГСД. Это обусловлено тем, что

алгоритмы оценки ГСИ являются достаточно простыми алгебраическими выражениями (см. *табл. 1* и *2*), обеспеченными инструментами конфигурирования в составе сервисов семейства «Созвездие-Вега». Описанные выше свойства ГСИ послужили веским основанием для включения инструментов для оценивания ГСИ и их анализа в состав сервисов семейства «Созвездие-Вега».

ГСИ, используемые при исследовании растительных покровов

Области применения ГСИ при исследовании растительных покровов включают в себя определение по ГСИ состояния, состава, структуры и запаса лесных покровов, наблюдение динамики лесных пожаров для прогнозирования их развития, мониторинг состояния сельскохозяйственных культур, а также контроль качества почвы, включая определение ее плодородия и запасов влаги. Для непосредственного контроля состояния растительного покрова используются так называемые вегетационные индексы, с помощью которых можно определять количество влаги и различных веществ, характеризующих состояние и динамику развития исследуемых растений (Darvishzadeh, 2008; Yakushev et al., 2013; Канаш, 2015).

Широко используемые вегетационные ГСИ, сервисами для анализа которых в рамках настоящей работы были оснащены инструменты системы Созвездие-Вега, представлены в *табл. 1*. Наряду с вегетационными индексами в этот набор включены также индексы, которые могут быть использованы для определения параметров лесных пожаров, а также для получения надежных данных о состоянии лесной растительности в зонах задымления. В данный набор были включены индексы, правомерность применения которых подтверждена многолетними исследованиями, что отражено в многочисленных публикациях по их применению (см., например, http://www.indexdatabase.de/db/s-single.php?id=36). Выбранные ГСИ представляют собой преимущественно рациональные выражения, которые в процессе исследований неоднократно преобразовывались и улучшались для получения более точных и устойчивых результатов анализа состояния растительности. Важно то, что эти индексы, как видно из *табл. 1*, определяются достаточно простыми соотношениями, легко реализуемыми в виде инструментов удаленного доступа, т.е. полностью соответствуют основному направлению развития сервисов семейства «Созвездие-Вега». Следует отметить также то, что они на практике используются в большом числе разнообразных приложений.

В *табл. 2* представлен набор ГСИ, позволяющий устанавливать состояние сельскохозяйственных угодий. Этот набор сформирован и адаптирован для использования в российских погодно-климатических условиях, в основном, в работах Агрофизического института РАН (Yakushev et al., 2013; Канаш, 2015). Наряду с вегетационными ГСИ нами в этот набор включены также ГСИ, характеризующие колориметрические индексы почвы, которые, как показано в работе (Luo et al., 2008), могут быть использованы для определения относительного содержания органики в почве, т.е. для определения ее плодородия.

Таблица 1. ГСИ, определяющие состояние вегетативных покровов

Аббревиатура	***Название индекса***	***Области применения***	***Оценка по отражательной способности ρ_{xxx} на соответствующих длинах волн (xxx – длина волны в нм)***	***Оценка по отражательной способности R_{xx} в канале Hyperion EO-1 (xx – номера канала)***	***Источник***
$AFVI_{1600}$ (Aerosol Free Vegetation Index 1600)	Вегетационный индекс, свободный от воздействия аэрозоля	Показатель зеленой здоровой растительности, не зависящий от дыма, антропогенных загрязнений и вулканической пыли	$AFVI_{1600} = \frac{\rho_{800} - 0,66 \times \rho_{1600}}{\rho_{800} + 0,66 \times \rho_{1600}}$	$AFVI = \frac{R_{45} - 0,66 \times R_{146}}{R_{45} + 0,66 \times R_{146}}$	Karnieli et al., 2001
DWSI5 (Disease Water Stress Index 5)	Индекс водного стресса	Показатель дефицита влаги, приводящего к повышению уровня заболеваемости растений	$DWSI5 = \frac{\rho_{800} - \rho_{550}}{\rho_{1660} + \rho_{680}}$	$DWSI5 = \frac{R_{45} - R_{20}}{R_{151} + R_{33}}$	Apan et al., 2003
EVI (Enhanced Vegetation Index)	Улучшенный вегетационный индекс	Показатель, отражающий общую биомассу растительности	$EVI = \frac{2,5(\rho_{780-1400} - \rho_{640-760})}{\rho_{780-1400} + 6 \times \rho_{640-760} - 7,5 \times \rho_{420-480} + 1}$	$EVI = \frac{2,5(R_{95} - R_{35})}{R_{95} + 6 \times R_{35} - 7,5 \times R_{10} + 1}$	Huete et al.,1999
NDNI (Normalized Difference Nitrogen Index)	Нормализованный разностный азотный индекс	Показатель, определяющий содержание азота	$NDNI = \frac{\log\left(\frac{1}{R_{137}}\right) - \log\left(\frac{1}{R_{154}}\right)}{\log\left(\frac{1}{R_{137}}\right) + \log\left(\frac{1}{R_{154}}\right)}$	$NDNI = \frac{\log\left(\frac{1}{R_{137}}\right) - \log\left(\frac{1}{R_{154}}\right)}{\log\left(\frac{1}{R_{137}}\right) + \log\left(\frac{1}{R_{154}}\right)}$	Herrmann et al., 2010
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	Нормализованный разностный вегетационный индекс (узкополосный аналог)	Универсальный индикатор наличия зеленой здоровой растительности	$NDVI = \frac{\rho_{800} - \rho_{670}}{\rho_{800} + \rho_{670}}$	$NDVI = \frac{R_{45} - R_{32}}{R_{45} + R_{32}}$	Rouse et al., 1974
OSAVI (Optimized Soil Adjusted Vegetation Index)	Вегетационный индекс, оптимально учитывающий влияние почвы при несомкнутом растительном покрове	Характеристика зеленой здоровой растительности, оптимизированная для применения к разреженному растительному покрову	$OSAVI = \frac{(1+0,16)(\rho_{800} - \rho_{670})}{\rho_{800} + \rho_{670} + 0,16}$	$OSAVI = \frac{(1+0,16)(R_{45} - R_{32})}{R_{45} + R_{32} + 0,16}$	Rondeaux et al., 1996; Daughtry et al., 2000
PEI (Potassium Emission Index)	Излучательный индекс калия	Показатель интенсивности горения лесного пожара, характеризующий интенсивность горения древесины	$PEI = \frac{\rho_{770}}{\rho_{780}}$	$PEI = \frac{R_{770}}{R_{780}}$	Dennison, Roberts, 2009
TCARI (Transformed Chlorophyll Absorbtion Ratio Index)	Трансформированный относительный индекс поглощения в хлорофилле	Содержание хлорофилла	$TCARI = 3\left[(\rho_{700} - \rho_{670}) - \frac{0,2\rho_{700}(\rho_{700} - \rho_{550})}{\rho_{670}}\right]$	$TCARI = 3\left[(R_{35} - R_{32}) - \frac{0,2R_{35}(R_{35} - R_{20})}{R_{32}}\right]$	Haboudane et al., 2002
HFDI (Heprspectral Fire Detection Index)	Гиперспектральный индекс для детектирования лесных пожаров	Показатель наличия открытого пламени на участке леса	$HFDI = \frac{\rho_{2061} - \rho_{2429}}{\rho_{2061} + \rho_{2429}}$	$HFDI = \frac{R_{191} - R_{227}}{R_{191} + R_{227}}$	Dennison, Roberts, 2009

Таблица 2. Индексы, эффективно применяемые в точном земледелии

Аббревиатура	***Название индекса***	***Области использования***	***Оценка по отражательной способности ρ_{xxx} на соответствующих длинах волн (xxx – длина волны в нм)***	***Оценка по отражательной способности R_{xx} в канале Hyperion EO-1 (xx – номера канала)***	***Источник***
ARI (Anthocyanin Reflectance Index)	Антоциановый отражательный индекс	Показатель содержания антоцианов (красно-фиолетовых растительных пигментов), накопление которых является признаком угнетения растений и замедления их роста	$ARI = C_2 + \left(\frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}}\right) \times \rho_{750}$ $C_2 = 0,5$	$ARI = C_2 + \left(\frac{1}{R_{20}} - \frac{1}{R_{35}}\right) \times R_{40}$ $C_2 = 0,5$	Merzlyak et al., 2003; Yakushev et al., 2013; Канаш, 2015
ChlRI (Chlorophyll reflection index)	Отражательный индекс хлорофилла	Показатель содержания хлорофилла, характеризующий емкость фотосинтетического аппарата и его потенциальную способность абсорбировать солнечный свет	$ChlRI = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2\rho_{445}}$	$ChlRI = \frac{R_{40} - R_{35}}{R_{40} + R_{35} - 2R_{10}}$	Sims, Gamon, 2002; Канаш, 2015
FRI (Flavonol Reflectance Index)	Флавоноловый отражательный индекс	Показатель содержания флавонолов (желто-оранжевых растительных пигментов), накопление которых является признаком угнетения растений и замедления их роста	$FRI = C_3 + \left(\frac{1}{\rho_{410}} - \frac{1}{\rho_{460}}\right) \times \rho_{800}$ $C_3 = 0,5 \div 0,7$	$FRI = C_3 + \left(\frac{1}{R_6} - \frac{1}{R_{11}}\right) \times R_{45}$ $C_3 = 0,5 \div 0,7$	Merzlyak et al., 2005; Yakushev et al., 2013
PRImod (Modified Photochemical Reflectance Index)	Модифицированный фотохимический отражательный индекс	Показатель фотохимической активности фотосинтетического аппарата, позволяющий оценить интенсивность тепловой диссипации. Указывает на изменение относительного уровня ксантофиллов (желтых растительных пигментов)	$PR\mathrm{Im}od = C_1 - \frac{(\rho_{570} - \rho_{531})}{(\rho_{570} + \rho_{531})}$ $C_1 = 0,3$	$PR\mathrm{Im}od = C_1 - \frac{(R_{22} - R_{18})}{(R_{22} + R_{18})}$ $C_1 = 0,3$	Peñuelas et al., 1995; Yakushev et al., 2013; Канаш, 2015
R800 (Indicator of light scattering)	Индикатор светового рассеивания	Показатель рассеяния света, зависящий от внутренней структуры листа	ρ_{800}	R_{45}	Sims, Gamon, 2002; Канаш, 2015
SIPI (Structure Intensitive Pigment Index)	Структурный индекс интенсивности пигментов	Показатель рассеяния света, зависящий от внутренней структуры листа	$SIPI = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$	$SIPI = \frac{R_{45} - R_{10}}{R_{45} - R_{33}}$	Peñuelas et al., 1995; Канаш, 2015
CI (Coluration Index)	Индекс окраски (окрашивания)	Характеристика цвета почвы. Используется для оценки плодородия (Luo et al., 2008)	$CI = \frac{\rho_{681} - \rho_{569}}{\rho_{681} + \rho_{569}}$	$CI = \frac{R_{33} - R_{22}}{R_{33} + R_{22}}$	Mathieu, Pouget, 1998
HI (Hue Index)	Индекс цветового тона	Основные цвета почвы. Используется для оценки плодородия (Luo et al., 2008)	$HI = \frac{2\rho_{681} - \rho_{569} - \rho_{487}}{\rho_{569} - \rho_{487}}$	$HI = \frac{2R_{33} - R_{22} - R_{14}}{R_{22} - R_{14}}$	Mathieu, Pouget, 1998

Организация системы работы с ГСИ в сервисе «Созвездия-ВЕГА»

Инструменты для работы со спектральными индексами, доступные в информационных системах семейства «Созвездие-Вега», появились в результате расширения функционала средств и инструментов «Созвездия-Вега».

В простейшем случае для пользователя систем работа со спектральными индексами выглядит следующим образом: выбор спутниковых данных, выбор необходимого индекса, расчет индекса для конкретных данных и анализ полученного результата. То есть инструмент для расчета индексов позволяет применить выбранный пользователем индекс к любому спутниковому снимку в системе, имеющему соответствующие индексу каналы. Результатом применения индекса является изображение, каждый пиксель которого вычислен по формуле выбранного индекса из каналов с соответствующей индексу длиной волны. При этом весь процесс расчета и представления результата занимает малое время, исчисляемое в секундах, и у пользователей нет необходимости скачивать спутниковые данные. Вся работа проводится только в картографическом web-интерфейсе, с использованием только браузера без дополнительного программного обеспечения.

На основе материалов различных публикаций, указанных выше, была создана база данных спектральных индексов, разделенная по областям их применения. В частности, в состав таких областей включены такие классы объектов наблюдения, как «Атмосфера» (аэрозоль, дымка, характеристики облачности), «Лес» (характеристики растительного покрова лесов), «Пожары» (лесные и степные пожары), «Почва» (оценки плодородия и классификация типов почв), «Растительность» (общие характеристики растительности), «Сельское хозяйство» (характеристики сельскохозяйственной растительности). Инструментарий позволяет хранить, добавлять, редактировать и искать индексы с фильтрацией по области применения и типу данных. Кроме уже имеющихся в составе сервисов «Созвездия-Вега» **базовых индексов**, представленных в *табл. 1* и *2*, пользователь, работая только с картографическим интерфейсом, может создавать свои собственные **пользовательские индексы**, задавая их с помощью арифметических и логических выражений с участием целых и дробных чисел, нормировок и математических функций, применяемых к любым доступным каналам исходных спутниковых данных и продуктов. Созданные индексы в дальнейшем могут быть использованы другими пользователями системы.

Организация работы со спектральными индексами базируется на ранее выполненных разработках института. Общие принципы создания картографических web-интерфейсов этих систем и расширения их новыми функциями описаны в статье (Толпин и др., 2011). В статье (Кашницкий и др., 2015) рассмотрены организация работы со спутниковыми данными в задачах их обработки и анализа, технология создания инструментов для удаленной обработки спутниковых данных. В соответствии с этой технологией процесс расчета проходит следующие этапы:

- запрос пользователем выбранного индекса из картографического интерфейса на определенных данных и заданную территорию, занесение запроса в базу расчетов на сервер баз данных;

- анализ установленной задачи через менеджер заданий на сервере выполнения заданий (обработчике) и запрос исходных данных с серверов хранения данных;
- подготовка исходных канальных данных для дальнейшего расчета (перепроекция при необходимости, калибровка, вырезание нужной области, требуемых каналов и т.д.) на серверах подготовки исходных данных в самих центрах хранения и архивации, пересылка результата на обработчик;
- проведение попиксельных вычислений на обработчике над полученными подготовленными исходными данными по указанной в индексе формуле;
- передача в интерфейс информации о завершении выполнения задания, демонстрация результата пользователю.

Несколько примеров использования индексов для анализа состояния различных объектов будут приведены в следующей главе.

Примеры использования ГСИ для анализа состояния различных объектов

Основу сервисов для работы с ГСИ в составе сервисов информационных систем семейства «Созвездие-Вега» составляет функционал инструмента «Алгебра изображений». Он позволяет пользователям производить алгебраические и логические преобразования различных спутниковых, в том числе и гиперспектральных, данных. Ряды спутниковых измерений, представленные в виде абсолютных, или калиброванных, данных, в результате применения этого инструмента могут быть преобразованы в соответствии с выражениями, которые задаются через web-интерфейс семейства «Созвездие-Вега». В результате такого преобразования, как указано выше, из существующих растровых слоев с использованием арифметических и/или логических выражений, включающих операции с целыми или действительными числами, процедуры нормализации, а также математические функции, формируется новое растровое изображение – сцена ГСИ.

При наличии инструмента «Алгебра изображений» картографические web-интерфейсы семейства «Созвездие-Вега» позволяют вычислять разные спектральные индексы «на ходу» и, тем самым, оперативно тестировать новые экспериментальные тематические продукты. В частности, пользователь может строить различные индексы, используя априорную информацию о спектральных полосах поглощения и/или излучения для изучения минералогического и химического состава объектов на поверхности Земли и в слое атмосферы. Следует отметить, что эти операции могут проводиться на всех видах наборов данных, хранящихся в архивах семейства «Созвездие-Вега». Это означает, что пользователи при формировании изображений одной и той же сцены спектральных индексов могут использовать не только данные одной из сцен гиперспектральных изображений, но также любую комбинацию каналов любого из мультиспектральных и гиперспектральных сенсоров, данные которых хранятся в архивах «Созвездие-Вега».

Помимо создания собственных формул для расчета индексов, web-интерфейс семейства «Созвездие-Вега» поддерживает возможность создания, хранения и редактирования

новых гиперспектральных индексов для таких целевых областей, как участки с растительностью (лес и сельское хозяйство), открытые грунтовые поверхности, места лесных пожаров и тепловых аномалий. Для каждого из них сервисы семейства «Созвездие-Вега» предлагают определенный набор показателей, позволяющих оценить параметры контролируемого объекта с большой достоверностью и надежностью. Эксперименты с применением индексов, построенных по данным дистанционных наблюдений с использованием гиперспектрометра Hyperion спутника EO-1, показали хорошие результаты при изучении характеристик указанных целевых объектов.

Общий вид web-интерфейса семейства «Созвездие-Вега» для работы с **базовыми индексами** на примере расчета NDVI по данным гиперспектрометра Hyperion спутника EO-1 на частотах 800 и 680 нм приведен на *рис. 1*.

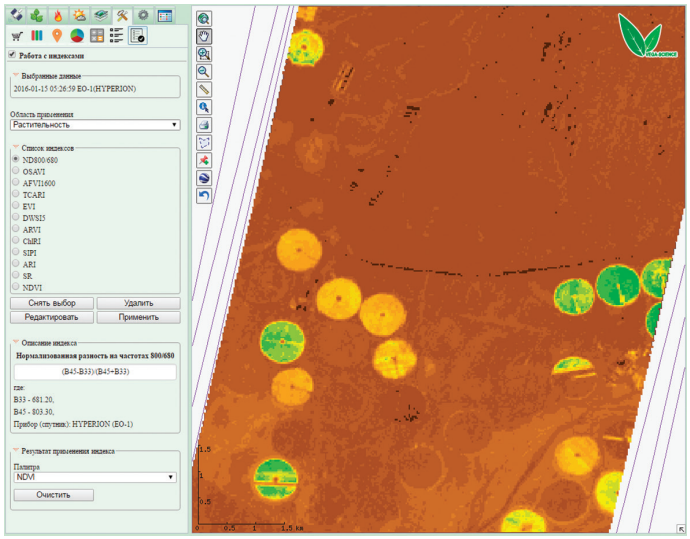

Рис. 1. Web-интерфейс семейства «Созвездие-Вега» для работы со спектральными индексами (данные Hyperion спутника EO-1, 15.01.2016, Саудовская Аравия)

Порядок формирования **пользовательских ГСИ** через web-интерфейс семейства «Созвездие-Вега» представлен на *рис. 2*. Он показывает возможный порядок модификации индекса TCARI (Haboudane et al., 2002) на сельскохозяйственных площадях в Саратовской области. В данном случае хорошо видны существенные различия между орошаемыми (светлые кружки) и неорошаемыми полями в конце летнего сухого сезона (август). Модифицируя состав и относительные вклады привлекаемых для расчета индекса TCARI каналов гиперспектрометра Hyperion спутника EO-1, пользователь в данном случае имеет возможность анализировать его зональную форму. В данном примере это можно реализовать путем достижения максимального по выборке контраста между орошаемыми (светлые кружки) и неорошаемыми (темные прямоугольники в нижней части изображения) сельхозугодьями.

Эффективность применения ГСИ наглядно видна из сопоставления различных продуктов анализа ГСД районов интенсивного земледелия. В качестве одного из таких реперных районов в работе наряду с гиперспектральными наблюдениями Саратовской

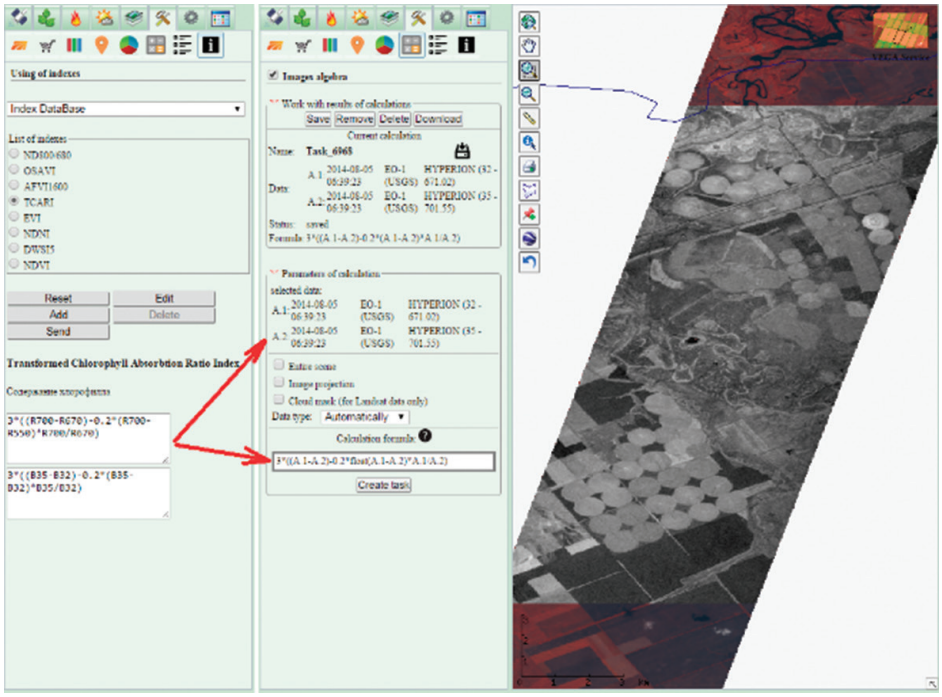

Рис. 2. Порядок формирования пространственного распределения (карты) ГСИ TCARI (данные Hyperion спутника EO-1, 08.05.2014, Саратовская область)

области были использованы ГСД наблюдений Краснодарского края. При этом в состав данных для анализа эффективности были включены как данные зон интенсивного полива (рисовые чеки), так и неполивные земли. Для одного и того же набора исходных ГСД Hyperion была подготовлена серия карт по предварительно сформированным и включенным в состав сервисов семейства «Созвездие-Вега» представлениям ГСИ, показанным в *табл. 1* и *2*.

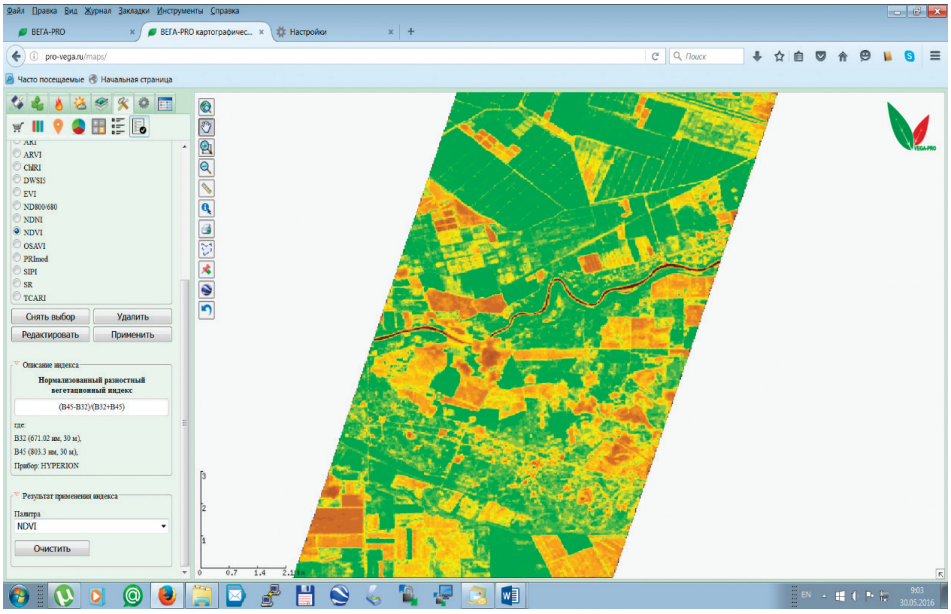

Рис. 3. Пространственное распределение NDVI (в палитре NDVI) (данные Hyperion спутника EO-1, 12.07.2012, Краснодарский край)

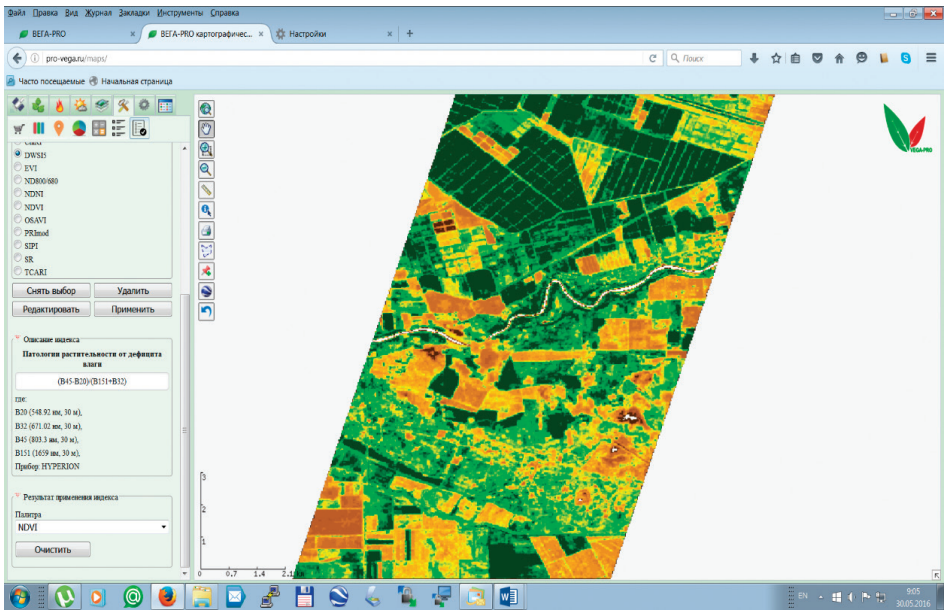

Рис. 4. Пространственное распределение ГСИ DWSI5 (в палитре NDVI) (данные Hyperion спутника EO-1, 12.07.2012, Краснодарский край).

Сопоставляя результаты анализа, представленные на *рис. 4* и *5*, можно отметить, что ГСИ DWSI5 существенно лучше отображает стрессы растительности, вызванные дефицитом влаги, чем NDVI. Это видно, в частности, из сопоставления зон интенсивного орошения (верхние части изображений) и неорошаемых полей (нижняя часть). Кроме того, на *рис. 4* для DWSI5 видно больше цветоконтрастных градаций, что, в принципе, должно давать возможность более точно и полно описывать состояние и динамику изменчивости контролируемых сельскохозяйственных угодий.

В качестве иллюстрации эффективности применения ГСИ в лесном хозяйстве нами на *рис. 5* приведено сопоставление карты лесного покрова NDVI (А) с картой AFVI1600 (Б) в зоне лесного пожара. Можно отметить значительное улучшение возможностей применения AFVI1600 (Б) для исследования характеристик лесного покрова под слоем дыма по сравнению с использованием в тех же целях NDVI (А). Поэтому карта AFVI1600 является существенным дополнительным источником данных для получения достоверных прогнозов по динамике пожара, так как ее применение позволяет более достоверно судить о состоянии древостоя под слоем дыма, что и видно из *рис. 5*.

А) NDVI Б) AFVI1600

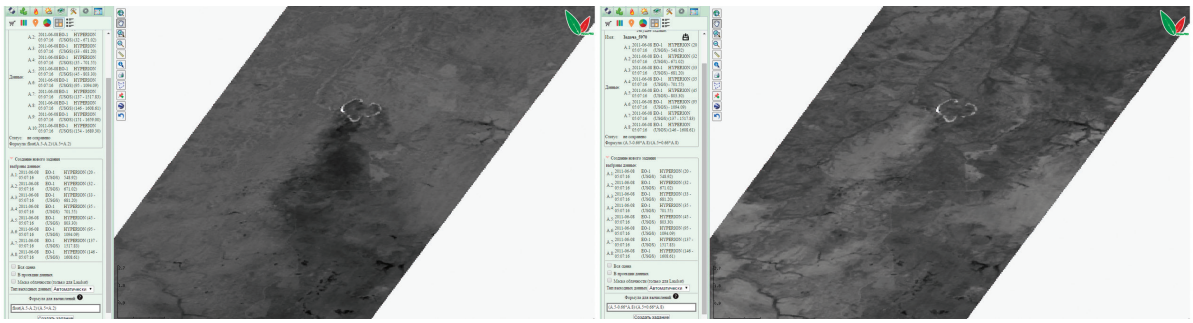

Рис. 5. Пространственные распределения NDVI (А) и AFVI1600 (Б) (данные Hyperion спутника EO-1, 08.06.2011, Красноярский край)

Заключение

В статье представлены результаты работ по расширению состава сервисов информационных систем семейства «Созвездие-Вега» за счет включения в них инструментов для работы с гиперспектральными индексами (ГСИ). Основным результатом работы является формирование набора аналитических web-инструментов, позволяющих в оперативном режиме получать пространственные распределения **базовых ГСИ** из заранее сформированного их набора. Наряду с этим, разработанные сервисы позволяют в оперативном режиме формировать и **пользовательские ГСИ**, что также существенно повышает аналитические возможности семейства «Созвездие-Вега». В частности, в рамках проекта Минобрнауки России «Развитие автоматизированных методов и информационных технологий глобального спутникового мониторинга сельского хозяйства в поддержку программы GEOGLAM», (Контракт 14.616.21.0063, Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61615X0063), на основе выполненных разработок в системе «Вега-Geoglam» (Толпин и др., 2015), был реализован специализированный инструментарий анализа гиперспектральных данных для решения задач мониторинга сельскохозяйственных земель и посевов. Эффективность применения разработанных средств подтверждена примерами применения ГСИ в целевых ориентированных приложениях, когда наиболее полно проявляются их преимущества по сравнению с нецелевыми индексами типа NDVI.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-07-12116 офи_м и № 16-29-09615 офи_м. В работе использованы архивы ГИС, предоставляемые Центром коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015), которые развиваются при поддержке ФАНО (тема «Мониторинг» госрегистрация № 01.20.0.2.00164)

Литература

1. *Барталев С.А, Ершов Д.В., Лупян Е.А., Толпин В.А.* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли, 2012. Т. 9. № 1. С. 49–56.
2. *Гордеев Е.И., О.А. Гирина, Лупян Е.А., Ефремов В.Ю., Сорокин А.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Романова И.М., Королев С.П., Крамарева Л.С.* Возможности использования данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для изучения активности вулканов Камчатки с помощью геопортала VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 267–284.
3. *Канаш Е.В.* Основные характеристики агрофитоценозов для дешифрования спектральных данных дистанционного зондирования // Материалы Всероссийской научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». Санкт-Петербург, 16–17 сентября 2015 г. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 25–28.
4. *Кашницкий А.В., Балашов И.В., Лупян Е.А., Толпин В.А., Уваров И.А.* Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156–170.
5. *Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В., Крашенинникова Ю.С.* Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 26–43.
6. *Лупян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И.* Спутниковый сервис SeetheSea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–262.
7. *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения

задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 247–267.
8. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А, Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности «ВЕГА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
9. *Лупян Е.А., Саворский В.П., Шокин Ю.И., Алексанин А.И., Назиров Р.Р., Недолужко И.В., Панова О.Ю.* Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 21–44.
10. *Толпин В.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Ладонина Н.Н., Стыценко Ф.В.* Информационная система глобального спутникового мониторинга сельского хозяйства VEGA-GEOGLAM // Тринадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2015. С. 431.
11. *Толпин В.А, Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В.* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.
12. *Уваров И.А., Матвеев А.М., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Саворский В.П., Суднева О.А.* Организация распределенной работы с данными спутниковых гиперспектральных наблюдений для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11 № 1. С. 322–333.
13. *Amigo J.M., Babamoradi H., Elcoroaristizabal S.* Hyperspectral image analysis. A tutorial // Analytica Chimica Acta. 2015. Vol. 896. P. 34–51.
14. *Apan A., Held A., Phinn S., Markley J.* Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 Hyperion imagery for discriminating sugarcane disease // Spatial Sciences Institute Biennial Conference (SSC 2003): Spatial Knowledge Without Boundaries. Canberra, Australia, 22–26 September 2003.
15. *Bellman R.* Adaptive Control Processes: A Guided Tour. Princeton University Press, 1961. XVI + 255 p.
16. *Boschetti M., Nutini F., Manfron G., Brivio P.A., Nelson A.* Comparative Analysis of Normalised Difference Spectral Indices Derived from MODIS for Detecting Surface Water in Flooded Rice Cropping Systems // PLoS One. 20 February 2014.
17. *Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo E., Hoefen T., Kokaly R., Sutley S.J.* USGS digital spectral library splib06a. U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231. 2007.
18. *Darvishzadeh R.* Hyperspectral remote sensing of vegetation parameters using statistical and physical models. Ph. D. thesis // International Institute for Geo-information Science & Earth Observation. Enschede, the Netherlands: Wageningen University, 2008. 169 P.
19. *Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M.S., Brown de Colstoun E., McMurtrey III J.E.* Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance // Remote Sensing of Environment. 2000. Vol. 74. P. 229–239.
20. *Dennison P.E., Roberts D.A.* Daytime fire detection using airborne hyperspectral data // Remote Sensing of Environment, 2009. Vol. 113. P. 1646–1657.
21. *Guyon I., Elisseeff A.* An Introduction to Feature Extraction // Studies in Fuzziness and Soft Computing. 2006. Vol. 207. P. 1–25.
22. *Haboudane D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J., Dextraze L.* Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 81. P. 416–426.
23. *Herrmann I., Karnieli A., Bonfil D. J., Cohen Y., Alchanatis V.* SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields // International Journal of Remote Sensing. 2010. Vol. 31. Issue 19. P. 5127–5143.
24. *Hsu P.-H.* Spectral Feature Extraction of Hyperspectral Images using Wavelet Transform. Ph. D. Thesis. Tainan, Taiwan: National Cheng Kung University, R.O.C, 2003. 158 P.
25. *Huang X.-M., Hsu P.-H.* Comparison of wavelet-based and HHT-based feature extraction methods for hyperspectral image classification // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. Vol. 39. Pt. B7. P. 121–126.
26. *Huete A.R., Justice C., Van Leeuwen W.* Modis Vegetation Index (MOD 13). Algorithm Theoretical Basis Document Version 3. 1999. 129 p.
27. *James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R.* An introduction to statistical learning // Springer. 2013. P. 204.
28. *Karnieli A., Kaufman Y.J., Remer L., Wald A.* AFRI – aerosol free vegetation index // Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 77. P. 10–21.
29. *Luo Zh., Yaolin L., Jian W., Jing W.* Quantitative mapping of soil organic material using field spectrometer and hyperspectral remote sensing // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008. Vol. 37. Part B8. P. 901–906.
30. *Mathieu R., Pouget M.* Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 66. P. 7–28.
31. *Merzlyak M.N., Solovchenko A.E., Smagin A.I., Gitelson A.A.* Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and technique for non-destructive assessment // Journal of Plant Physiology. 2005. Vol. 162. P. 151–160.
32. *Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Pogosyan S.I.* Application of Reflectance Spectroscopy for Analysis of Higher Plant Pigments // Russian Journal of Plant Physiology. 2003. Vol. 50. No. 5. P. 704–710.
33. *Peñuelas J., Filella I., Gamon J.A.* Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance // The New Phytologist. November 1995. Vol. 131. No. 3, P. 291–296.
34. *Rondeaux G., Steven M., Baret F.* Optimization of soil-adjusted vegetation indices // Remote Sening of Environment. 1996. Vol. 55. P. 95–107.

35. *Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W.* Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Proceedings 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium. 1974. Vol. 1. P. 48–62.
36. *Sims D.A., Gamon J.A*. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sensing of Environment. August 2002. Vol. 81, Issues 2–3, P. 337–354.
37. *Smith R.B*. Introduction to Hyperspectral Imaging // MicroImages, Inc. 2010. 24 p. http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyprspec.pdf.
38. *Yakushev V.P., Kanash E.V., Osipov Yu.A*. Optical Criteria in Estimating Deficiency of Basic Macroelements and Plant Fertilizer Requirements // EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation". Turin, Italy, 24-27 June 2013. http://www.cigr.org/Proceedings/uploads/2013/0217.pdf.

Capabilities of hyperspectral indices analysis of the Vega-Constellation remote monitoring information systems

V.P. Savorskiy[1,2], A.V. Kashnitskiy[1], A.M. Konstantinova[1], I.V. Balashov[1], Yu.S. Krasheninnikova[1], V.A. Tolpin[1], S.M. Maklakov[2], E.V. Savchenko[2]

[1]Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru
[2]V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Department
Fryazino 141190, Moscow region, Russia
E-mail: savor@inbox.ru

The main purpose of the work was to expand the functionality of the Vega-Constellation information systems by updating them with new services to handle hyperspectral data (HSD) sets. These services had to be tailored to assist the user in the study of a particular type (class) of natural objects using hyperspectral indices (HSI). To achieve this goal, a range of universal analytical tools to work with HSD were created. At the first stage of the work, forest and agricultural areas were chosen as target investigation objects. The capabilities of various HSI to reliably and accurately reflect the states of an object under investigation were analyzed. For each object, a set of HSI was selected for inclusion in the Vega-Constellation basic HSI services. In addition, Vega-Constellation was developed to provide custom HSI services enabling the user to generate his own, i.e. user-defined, HSI sets, which was intended to improve the assessment of the objects states in specific climatic conditions. The effectiveness of the web tools developed for the analysis of HSI was confirmed by examples given in the paper. In particular, with the help of the tools it was clearly demonstrated that using targeted indices, such as DWSI5, for estimating the irrigation efficiency was more expedient in comparison to using NDVI for these purposes.

Keywords: remote sensing of the Earth, hyperspectral data, hyperspectral indices, Vega-Constellation

Accepted: 09.06.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45

References

1. Bartalev S.A., Ershov D.V., Loupian E.A., Tolpin V.A., Vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovogo servisa VEGA dlya resheniya razlichnykh zadach monitoringa nazemnykh ekosistem (Possibilities of Satellite Service VEGA Using for Different Tasks of Land Ecosystems Monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 49–56.
2. Gordeev E.I., Girina O.A., Loupian E.A., Efremov V.Yu., Sorokin A.A., Mel'nikov D.V., Manevich A.G., Romanova I.M., Korolev S.P., Kramareva L.S., Vozmozhnosti ispol'zovaniya dannykh giperspektral'nykh sputnikovykh nablyudenii dlya izucheniya aktivnosti vulkanov Kamchatki s pomoshch'yu geoportala VolSatView (Using satellite hyperspectral data to study the activity of Kamchatka volcanoes on the basis of the VolSatView geoportal), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 267–284
3. Kanash E.V., Osnovnye kharakteristiki agrofitotsenozov dlya deshifrovaniya spektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya (Basic characteristics of agrophytocenosis for decryption of spectral remote sensing data), *Proc. Conf. "Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaistve*" (Earth remote sensing agriculture applications), St. Petersburg: FGBNU AFI, 2015, pp. 25–28.
4. Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Loupian. E.A., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Sozdanie instrumentov dlya udalennoi obrabotki sputnikovykh dannykh v sovremennykh informatsionnykh sistemakh (Development of software tools

for satellite data remote processing in contemporary information systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 156–170.
5. Loupian E.A., Mazurov A.A., Nazirov R.R., Proshin A.A., Flitman E.V., Krasheninnikova Yu.S., Tekhnologii postroeniya informatsionnykh sistem distantsionnogo monitoringa (Technologies for Building Remote Monitoring Information Systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 26–43.
6. Loupian E.A., Matveev A.A., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sputnikovyi servis See the Sea – instrument dlya izucheniya razlichnykh yavlenii na poverkhnosti okeana (The Satellite Service See the Sea – a tool for the Study of Oceanic Phenomena and Processes), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–262.
7. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving,processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol.12, No. 5, pp. 247–267.
8. Loupian E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E., Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti («VEGA») (Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
9. Loupian E.A., Savorskii V.P., Shokin Yu.I., Aleksanin A.I., Nazirov R.R., Nedoluzhko I.V., Panova O.Yu., Sovremennye podkhody i tekhnologii organizatsii raboty s dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli dlya resheniya nauchnykh zadach (Up-to-date Approaches and Technology Arrangement of Earth Observation Data Applications Aimed to Solve Scientific Tasks), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 21–44.
10. Tolpin V.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Ladonina N.N., Stytsenko F.V., Informatsionnaya sistema global'nogo sputnikovogo monitoringa sel'skogo khozyaistva VEGA-GEOGLAM (VEGA-GEOGLAM global satellite agriculture monitoring information system), *13-ya konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (13th Conf. ''Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space''), Moscow, 16–20 November 2015, Book of Abstracts, pp. 431.
11. Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Loupian E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V., Sozdanie interfeisov dlya raboty s dannymi sovremennykh sistem distantsionnogo monitoringa (sistema GEOSMIS) (The GEOSMIS System: Developing Interfaces to Operate Data in Modern Remote Monitoring Systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 93–108.
12. Uvarov I.A., Matveev A.M., Burtsev M.A., Loupian E.A., Mazurov A.A., Proshin A.A., Savorskii V.P., Sudneva O.A., Organizatsiya raspredelennoi raboty s dannymi sputnikovykh giperspektral'nykh nablyudenii dlya resheniya nauchnykh i prikladnykh zadach (Distributed data management of hyperspectral remote sensing data for scientific purposes and applications), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 322–333.
13. Amigo J.M., Babamoradi H., Elcoroaristizabal S., Hyperspectral image analysis. A tutorial, *Analytica Chimica Acta*, 8 October 2015, Vol. 896, pp. 34–51.
14. Apan A., Held A., Phinn S., Markley J., Formulation and assessment of narrow-band vegetation indices from EO-1 Hyperion imagery for discriminating sugarcane disease, *Spatial Sciences Institute Biennial Conference (SSC 2003): Spatial Knowledge Without Boundaries*, 22-26 Sep 2003, Canberra, Australia.
15. Bellman R., *Adaptive Control Processes: A Guided Tour*, 1961, Princeton University Press, pp. XVI + 255.
16. Boschetti M., Nutini F., Manfron G., Brivio P.A., Nelson A., Comparative Analysis of Normalised Difference Spectral Indices Derived from MODIS for Detecting Surface Water in Flooded Rice Cropping Systems, *PLoS One*, 20 February 2014.
17. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R., Livo E., Hoefen T., Kokaly R., Sutley S.J., USGS digital spectral library splib06a, 2007, *U.S. Geological Survey*, Digital Data Series 231.
18. Darvishzadeh R., *Hyperspectral remote sensing of vegetation parameters using statistical and physical models, Ph. D. Thesis*, International Institute for Geo-information Science & Earth Observation, Enschede, The Netherlands, Wageningen University, 2008, 169 p.
19. Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M.S., Brown de Colstoun E., McMurtrey III, J.E., Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance, *Remote Sensing of Environment*, 2000, Vol. 74, pp. 229–239.
20. Dennison P.E., Roberts D.A., Daytime fire detection using airborne hyperspectral data, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, pp. 1646–1657.
21. Guyon I., Elisseeff A., An Introduction to Feature Extraction, *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 2006, Vol. 207, pp. 1–25.
22. Haboudane D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J., Dextraze L., Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 81, pp. 416–426.
23. Herrmann I., Karnieli A., Bonfil D. J., Cohen Y., Alchanatis V., SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields, *International Journal of Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, Issue 19, pp. 5127–5143.
24. Hsu P.-H., *Spectral Feature Extraction of Hyperspectral Images using Wavelet Transform*, *Ph.D. Thesis*, Tainan, Taiwan, National Cheng Kung University, R.O.C., 2003, 158 p.
25. Huang X.-M., Hsu P.-H., Comparison of wavelet-based and HHT-based feature extraction methods for hyperspectral image classification, International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, Vol. 39, Pt. B7, pp. 121–126.
26. Huete A.R., Justice C., Van Leeuwen W., Modis Vegetation Index (MOD 13). *Algorithm Theoretical Basis Document*, Version 3, 1999, 129 p.
27. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R., *An introduction to statistical learning*, Springer, 2013, 204 p., available at: http://www-bcf.usc.edu/~gareth/ISL.

28. Karnieli A., Kaufman Y.J., Remer L., Wald A., AFRI – aerosol free vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 2001, Vol. 77, pp. 10–21.
29. Luo Zh., Yaolin L., Jian W., Jing W., Quantitative mapping of soil organic material using field spectrometer and hyperspectral remote sensing, *Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, The International Archives, 2008, Vol. 37, Part B8, pp. 901–906.
30. Mathieu R., Pouget M., Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment., *Remote Sensing of Environment*, 1998, Vol. 66, pp. 17–28.
31. Merzlyak M.N., Solovchenko A.E., Smagin A.I., Gitelson A.A., Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and technique for non-destructive assessment, *Journal of Plant Physiology*, 2005, Vol. 162, pp. 151–160.
32. Merzlyak M.N., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Solovchenko A. E., Pogosyan S.I., Application of Reflectance Spectroscopy for Analysis of Higher Plant Pigments, *Russian Journal of Plant Physiology*, 2003, Vol. 50, No. 5, pp. 704–710.
33. Penuelas, J., Filella, I., Gamon, J.A., Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance, *The New Phytologist*, November 1995, Vol. 131, No. 3, pp. 291–296.
34. Rondeaux G., Steven M., Baret F., Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sening of Environment*, 1996, Vol. 55, pp. 95–107.
35. Rouse J.W., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W., Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *Proc. 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1974, Vol. 1, pp. 48-62.
36. Sims D.A. Gamon J.A., Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages, *Remote Sensing of Environment*, August 2002, Vol. 81, Issues 2–3, pp. 337–354.
37. Smith R.B., *Introduction to Hyperspectral Imaging*, MicroImages, Inc, 2010, available at: http://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyprspec.pdf.
38. Yakushev V.P., Kanash E.V., Osipov Yu. A., Optical Criteria in Estimating Deficiency of Basic Macroelements and Plant Fertilizer Requirements, *EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation"*, Turin, Italy, 24–27 June 2013, available at: http://www.cigr.org/Proceedings/uploads/2013/0217.pdf.