

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ (ПО ЗАРУБЕЖНЫМ ПУБЛИКАЦИЯМ)

© 2013 г. С. Л. Кравцов*, Д. В. Голубцов, Е. Н. Лисова

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Минск

* E-mail: Krautsou_sl@rambler.ru

Поступила в редакцию 05.04.2012 г.

Охарактеризованы основные пигменты растений, биофизические и биохимические факторы, определяющие спектры поглощения и отражения растительности. Рассмотрено влияние фаз развития, дефицита минеральных элементов, заморозков, болезней, повреждения градом и условий влажности на спектр отражения растительности. Представлены оптимальные для дистанционного мониторинга состояния растительности узкие спектральные каналы в диапазонах 395–1010 и 350–2500 нм, а также их ширина. Проведено сравнение информативности данных узких и широких каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности. Работа представляет собой систематизацию зарубежных публикаций по изложенным вопросам.

Ключевые слова: оптимальные каналы, дистанционный мониторинг, растительность

DOI: 10.7868/S020596141301003X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире сельское хозяйство является ведущей сферой использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Они широко используются в агропромышленных комплексах США, Канады, Евросоюза, Индии, Китая, Японии, Израиля. Существует более 30 национальных и национальных систем мониторинга с.-х. земель. С учетом все возрастающей роли сельского хозяйства в экономиках Республики Беларусь и Российской Федерации данное направление использования данных ДЗЗ и в наших странах со всем основанием претендует на роль приоритетного.

Растительность, как правило, покрывает почву, в результате сенсорами ДЗЗ регистрируется главным образом ее отражение/излучение. Данные гиперспектральных сенсоров нового поколения со многими узкими каналами, таких как AVIRIS, Hyperion и др., обеспечивают значительное улучшение информативности относительно данных многоканальных сенсоров старшего поколения с несколькими широкими каналами (Landsat TM/ETM+, SPOT HRV и др.). В частности для растительности значительно улучшаются отделимость и точность классификации видов, обнаружение стресса, извлечение биохимических характеристик, определение изменения влажности и различий в доле покрова (Thenkabail et al., 2004).

Однако эти преимущества достигаются сбором гиперспектральными сенсорами значительно больших объемов данных (относительно многоспектральных сенсоров), что ведет к многочисленным сложным техническим проблемам. Они включают передачу данных с сенсора (ширину полосы пропускания канала передачи), пространственное разрешение, атмосферную коррекцию, объем хранения и вычислений при анализе данных, их “избыточность” и алгоритмы обработки (Thenkabail et al., 2004; Thenkabail, 2001). Так, первый спутниковый гиперспектральный сенсор Hyperion (ИСЗ EO-1) собирает данные с радиометрическим разрешением 12 бит в 220 узких каналах диапазона 400–2500 нм с пространственным разрешением 30 м. Объем 1.0 км² изображения сенсора Hyperion составляет приблизительно 0.5 МБ по сравнению с 0.0067 МБ изображения сенсора Landsat TM с шестью широкими каналами – увеличение примерно в 37 раз. Объем же изображения гиперспектрального сенсора Warfighter-1 (ИСЗ Orbview-4) с 200 узкими каналами, спектральным разрешением 8 бит и пространственным разрешением 8 м составляет 3.125 МБ – увеличение в 469 раз (Thenkabail, 2001).

Для преодоления указанных проблем сенсоры будущих поколений, вероятно, будут специализированными, т.е. оптимизированными в сборе данных для определенных приложений (сельско-

го хозяйства, экологического мониторинга и т. д.), или гиперспектральными с большим количеством узких каналов (подобно Hyperspec), из которых пользователи смогут извлечь оптимальные каналы для соответствующих приложений (Thenkabail et al., 2004). Таким образом, нахождение оптимальных каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности имеет важное значение. Это помогло бы избежать “избыточности” данных при их обработке, а также разработать специализированные сенсоры (Thenkabail, 2001).

Данная статья представляет собой анализ и систематизацию результатов разрозненных многочисленных исследований в области дистанционного мониторинга состояния растительности. Представленные результаты могут быть полезны при выборе спектральных каналов разрабатываемой аэрокосмической аппаратуры дистанционного мониторинга с.-х. земель (в частности проектируемой в РФ спутниковой системы “Космос-СХ”).

ОСНОВНЫЕ ПИГМЕНТЫ РАСТЕНИЙ, БИОФИЗИЧЕСКИЕ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Основные пигменты растений

Хлорофиллы (Chl *a* и Chl *b*) – жизненно важный пигмент растений, необходимый для преобразования солнечного излучения в запасенную химическую энергию. Количество поглощенного растениями солнечного излучения является функцией содержания фотосинтезирующих пигментов (в первую очередь Chl). Таким образом, содержание Chl может напрямую определить фотосинтезирующий потенциал и, следовательно, первичную продуктивность (Gitelson et al., 2009). Помимо этого, Chl является косвенным индикатором обеспеченности минеральными элементами, поскольку в составе его молекулы находится большое количество азота (N). К тому же, в условиях природных или антропогенных стрессов и старения содержание Chl в растениях снижается (Blackburn, 2007), и изменяется отношение Chl *a* к Chl *b*, следовательно, оценка содержания Chl, а также отдельно Chl *a* и Chl *b* может предоставить информацию о взаимодействиях среда-растения и их физиологическом состоянии.

Каротиноиды (Car) являются второй основной пигментной группой растений, состоящей из каротинов и ксантофиллов (Blackburn, 2007). Красно-желтые цвета осенних листьев наблюдаются из-за изменения в фотопериоде (к коротким дням/длинным ночам) и/или низких температур, вызывающих старение, при котором разрушается Chl с одновременным повышением содержания Car (Ustin et al., 2009). Car могут поглощать сол-

нечное излучение и способствовать выработке энергии для фотосинтеза. В результате содержание Chl не является ограничивающим фактором переработки солнечного излучения для фотосинтеза, так как полученная энергия поглощается как Chl *b*, так и Car. Таким образом, фотосинтезирующий потенциал двух растений может отличаться, хотя поглощаемая ими доля солнечного излучения равна – в зависимости от соотношения содержания пигментов (Blackburn, 2007). Кроме того, когда солнечное излучение превышает необходимое для фотосинтеза, Car рассеивают избыток энергии и защищают центры реакции. Car играют ключевую роль в адаптации высших растений и к другим неблагоприятным условиям окружающей среды (Zur et al., 2000).

Таким образом, хотя изменения в содержании Chl являются индикатором стресса и фазы развития, изменение содержания Car и его соотношение с содержанием Chl обеспечивает дополнительную информацию и широко используется для диагностики состояния растений во время развития, старения, акклиматизации и адаптации к различным условиям окружающей среды и стрессам (Gitelson et al., 2009; Blackburn, 2007).

Антоцианы (Anth) – растворимые в воде флавоноиды – являются третьей основной пигментной группой растений (Blackburn, 2007). Зрелые темно-зеленые растения лишены Anth, их содержание значительно возрастает при стрессах (например, низких или высоких температурах), в ювенильных (в течение наиболее ранних фаз развития прежде, чем фотосистемы становятся полностью функциональными) и в стареющих растениях (обеспечивая в течение разрушения фотосинтезирующего механизма защиту от фототоксичности, обусловленной продуктами деградации Chl) и ответственны за их красную окраску. Anth могут изменять световую среду внутри растений и обладают потенциалом регулирования фотосинтеза и ограничения фотоингибирования и фотообесцвечивания, тем самым обладая фотопротектными функциями (Merzlyak et al., 2008). Защитные эффекты Anth связаны с их способностью посредством экранирования и/или заманивания света во внутреннюю ловушку уменьшить (в 2–4 раза) чрезмерное количество солнечного излучения, достигающего фотосинтезирующего аппарата, которое иначе было бы поглощено пигментами хлоропласта (Gitelson et al., 2009). Anth также могут (со значительным возрастанием содержания) повышать устойчивость растений к стрессовым воздействиям, например, низкой температуре (заморозкам), засухе, сильному ветру, бактериальной и грибной инфекциям, гербицидам и загрязняющим веществам, дефициту минеральных элементов (Gitelson et al., 2009; Blackburn, 2007). Кроме того, Anth обладают антиоксидантными свойствами, способствуя восстановлению расте-

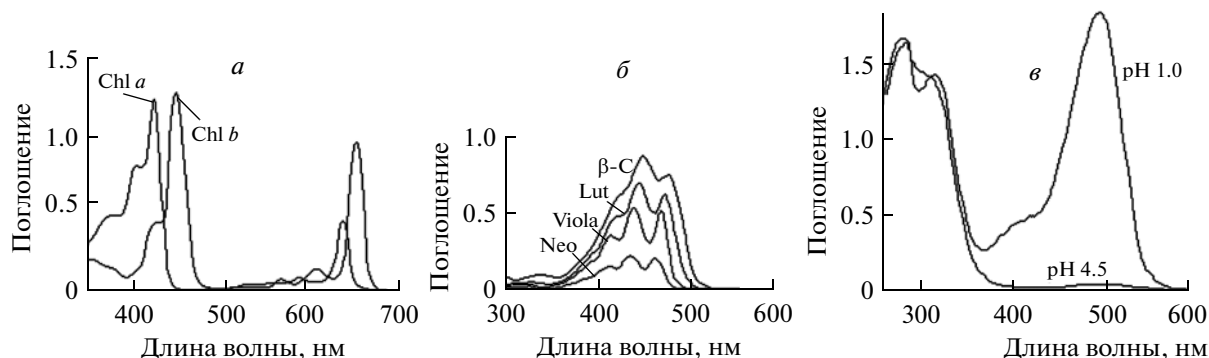


Рис. 1. Спектры поглощения основных пигментов растений: *a* – Chl в диэтиловом эфире; *б* – Caг в диэтиловом эфире (β -C – β -каротин, Lut – лютеин, Neο – неоксантин, Viola – виолаксантин); *в* – Anth очищенной редики в растворах pH = 1.0 и pH = 4.5.

ний после травм. Помимо этого, Anth могут обеспечить защиту от травоядных животных и грибковых патогенов (Ustin et al., 2009).

Поскольку содержание Anth является индикатором многих видов стресса, оценка его динамики предоставляет информацию о чувствительности и адаптации растений к стрессу (Gitelson et al., 2009).

Влияние основных пигментов на спектр поглощения растительности

Пигменты поглощают излучение на определенных длинах волн, уменьшая коэффициент отражения. Chl *a* и Chl *b* в диэтиловом эфире имеют узкие полосы поглощения (рис. 1*a*) в синей (около 428 и 453 нм) и красной (около 661 и 642 нм) областях спектра (Ustin et al., 2009; Wrolstad, 2000). Для Caг характерна широкая полоса поглощения с тремя максимумами в синей области спектра в диапазоне 400–500 нм (рис. 1*б*). Все Anth содержат две отличительные полосы поглощения (рис. 1*в*) – одну в ультрафиолетовой (260–280 нм) и другую в сине-зеленой областях спектра (490–550 нм) (Wrolstad, 2000).

Биофизические и биохимические источники изменчивости спектра отражения растительности

На спектр отражения листьев влияет множество факторов: содержание CO₂, N, лигнина, целлюлозы, воды, полярных (растворимые полифенолы, сахара, крахмал и др.) и неполярных (жиры, воски, фенольные смолы и др.) экстрагируемых веществ, характеристики поверхности (ворсистость и др.), внутренняя структура листьев (преломляющие неоднородности между стенками клеток и межклеточными воздушными пространствами) (Blackburn, 2007). Спектр отражения покрова находится под влиянием еще более сложных факторов: тканей (листьев и нефотосинтезирующей части рас-

тений – деревянистых стеблей, отмершей биомассы и др.), биофизических свойств (площади и ориентации листьев и стеблей, группирования листьев и др.), фона почвы, условий освещения и геометрии наблюдения (Asner, 1998). Так, для покрова, состоящего преимущественно из листьев, при их горизонтальной ориентации и высокой биомассе большинство информации масштаба листьев переводится в масштаб покрова. А нефотосинтезирующая часть растений оказывает значительное влияние на спектр отражения покрова, когда ее доля высока (Asner, 1998).

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СПЕКТР ОТРАЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Влияние фаз развития на спектр отражения растительности

В течение вегетационного сезона наибольшие изменения спектра отражения покрова пшеницы происходят в зеленой и ближней ИК-областях спектра (рис. 2*a* (Franke, 2007)). Это вызвано изменением содержания Chl, биомассы и доли покрова. В начале вегетационного сезона коэффициент отражения в зеленой и ближней ИК-областях спектра возрастает из-за увеличения биомассы и уменьшения доли фона почвы (развитие листьев), на более поздних фазах развития коэффициент отражения в этих областях спектра уменьшается из-за созревания пшеницы и как следствие изменения структуры покрова (развитие плодов). Местоположение красного края спектра отражения покрова пшеницы в течение фаз роста находится в диапазоне 700–730 нм. От фазы кушения до фазы колошения наблюдается слабое смещение местоположения красного края спектров отражения покрова и листьев к более длинным длинам волн, а от фазы колошения до фазы созревания – значительное смещение к более коротким длинам волн (Xiaoping, 2008).

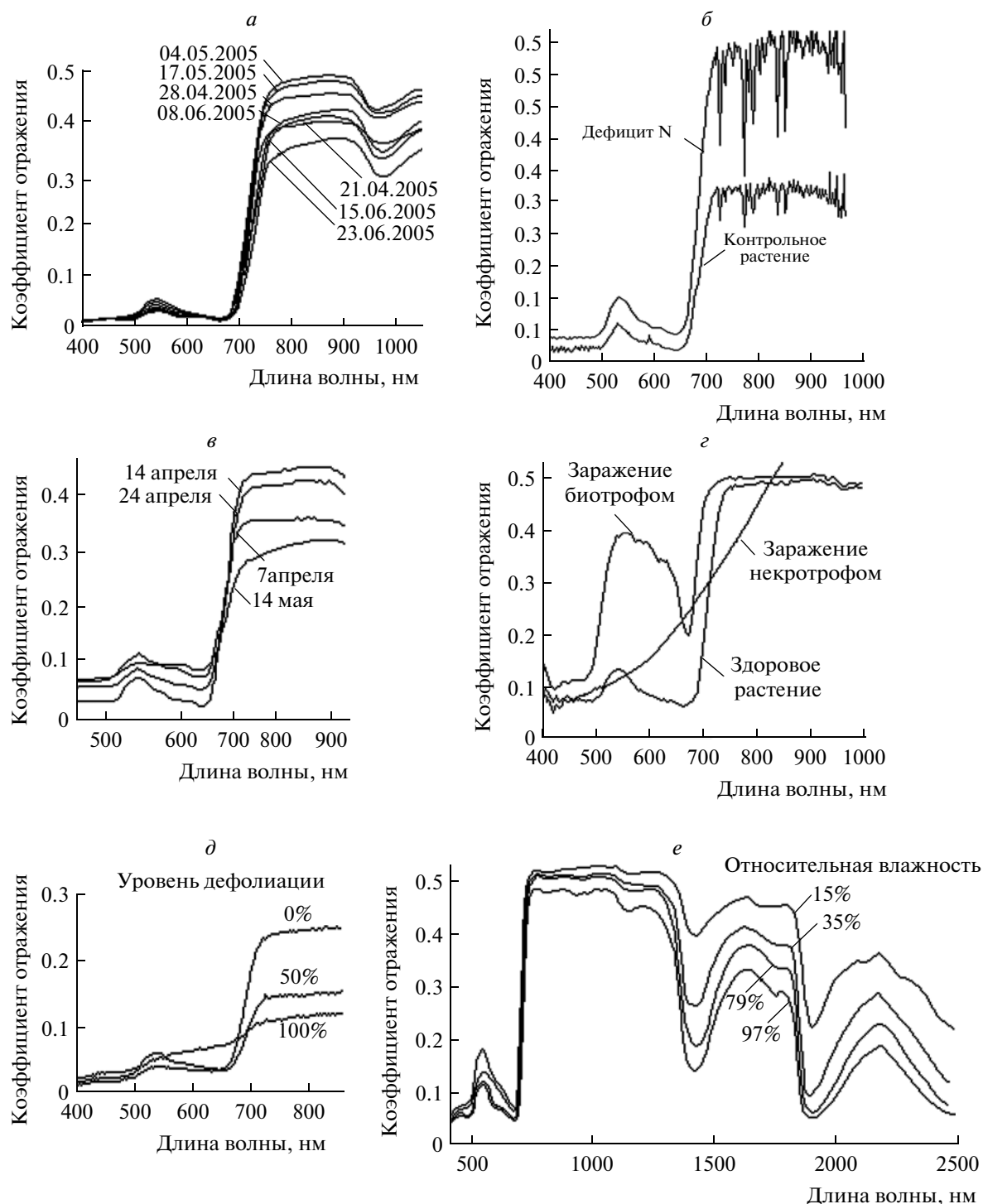


Рис. 2. Влияние на спектр отражения: *а* – различных фаз развития покрова пшеницы; *б* – дефицита азота растений пшеницы; *в* – заморозков для озимой пшеницы в фазе кущения; *г* – уровня дефолиации покрова кукурузы (стадия 8–12 листьев); *д* – наиболее типичных болезней зерновых культур; *е* – условий влажности для листьев пшеницы.

Влияние дефицита минеральных элементов на спектр отражения растительности

Дефицит минеральных элементов, как правило, уменьшает содержание Chl (Chl *a* и Chl *b*), вызывая смещение местоположения красного края к

более коротким длинам волн и возрастание коэффициента отражения листьев пшеницы (рис. 2б (Ayala-Silva, Beyl, 2005)). Дефициты N и магния (Mg) (важнейших элементов молекулы Chl) вызывают наибольшее уменьшение Chl *a* и Chl *b*, да-

лее – фосфор (P), калий (K) и кальций (Ca). Изменения спектра отражения и местоположения красного края пропорциональны уровням дефицита минеральных элементов и происходят в тех же диапазонах. В результате то же самое содержание Chl в листьях пшеницы, изменение коэффициента отражения, или смещение местоположения красного края могут быть обусловлены дефицитом разных минеральных элементов (например, как дефицитом K, так и дефицитом Mg) (Ayala-Silva, Beyl, 2005). Кроме того, при дефиците специфического минерального элемента значительно уменьшается не только его содержание в растениях, но также изменяется содержание иных минеральных элементов, – уменьшаясь или увеличиваясь по сравнению с контрольными растениями. Поэтому визуальные признаки дефицита, морфологические и физиологические изменения растений не могут быть обусловлены или охарактеризованы дефицитом только одного элемента, поскольку являются результатом дефицита нескольких элементов (Ayala-Silva, Beyl, 2005).

Влияние заморозков на спектр отражения растительности

Повреждение растений холодом сопровождается потерей ими тургора и изменением окраски (вследствие разрушения Chl и нарушения снабжения водой), снижением аэробного дыхания и фотосинтеза, деградацией хлоропластов, разрушением структуры пигментно-липидного комплекса, накоплением в тканях растворимых форм N и др. Основными причинами гибели клеток растений при отрицательных температурах являются чрезмерное обезвоживание клеток и/или механическое давление (сжатие клеток кристаллами льда). Последствия воздействия отрицательных температур зависят от оводненности тканей растений: насыщенные водой ткани легко повреждаются и растения могут погибнуть; тогда как при низком содержании воды льда образуется немного и клетки не повреждаются механически его кристаллами, в результате при последующем оттаивании растения могут сохранить жизнеспособность. Спустя две-три недели после заморозков поврежденные растения становятся желтыми (относительно контрольных растений), значение коэффициента отражения увеличивается в желтой и красной областях спектра, форма спектра отражения становится плоской (рис. 2в (Li et al., 2008)). После обморожения растений содержание Chl снижается, местоположение красного края смещается к более коротким длинам волн (Li et al., 2008).

Влияние повреждения градом на спектр отражения растительности

Ключевым параметром при оценке степени повреждения растений градом является уровень дефолиации – потери листы, которая снижает эффективность фотосинтеза и связана со способностью растений восстанавливаться после вызванного градом стресса (Young et al., 2004). Дефолиация напрямую связана с уменьшением площади листовой поверхности, разрушением структуры листьев и клеток растений, нарушением поглощения солнечного излучения Chl (Young et al., 2004; Chandler et al., 2004). Увеличение уровня дефолиации приводит к повышению значения коэффициента отражения в видимой (прежде всего в красной) области спектра и к понижению в ближней ИК-области спектра (Young et al., 2004; Aran et al., 2005; Chandler et al., 2002), – т.е. чем выше уровень дефолиации, тем больше спектр отражения растительности смещается в направлении спектра голый почвы (рис. 2г (Aran et al., 2005)).

Влияние болезней на спектр отражения растительности

Большинство болезней поражает только определенную часть растений (корни, стебли, листья, плоды и др.) и создает характерные признаки (мозаику, некроз, пятна, вялость и др.) (Gröll, 2008). После заражения паразиты извлекают питательные вещества из растений-хозяев различными способами и по этому признаку делятся на три группы: *некротрофы*, которые убивают клетки растений (рис. 2д (Steddom, 2005)); *биотрофы*, которые оставляют живыми клетки растений; *полубиотрофы*, которые первоначально поддерживают живыми клетки растений, но убивают их на более поздних стадиях инфекции (Gröll, 2008).

Болезни листьев (желтая ржавчина, мучнистая роса и др.) проявляются на внешней стороне покровов и поэтому легко обнаруживаются по изменениям спектра отражения. Напротив, корневые и стеблевые болезни (гельминтоспориозная корневая гниль, церкоспореллезная корневая гниль и др.) скрыты покровом, а потому могут быть идентифицированы только по вторичным признакам (стресс минеральных элементов, воды и др.). Некоторые болезни на более поздних стадиях инфекции вызывают характерный состав пигментов. В результате болезней (Gröll, 2008; Bravo, 2006; Stilwell, 2009) происходит следующее: а) уменьшается содержание Chl – затрагиваются видимая область спектра и область красного края (550 и 650–720 нм); б) происходит старение зараженных, а также близких к ним тканей – затрагиваются видимая, ближняя ИК (680–800 нм), и коротковолновая ИК-области спектра (1400–1600 и 1900–2100 нм); в) разрушается внутренняя струк-

тура листьев — затрагивается ближняя ИК-область спектра; г) изменяются плотность покрова и площадь листовой поверхности — затрагивается ближняя ИК-область спектра; д) увеличивается (на начальных стадиях инфекции)/уменьшается (на поздних стадиях инфекции) норма испарения — затрагивается тепловая ИК-область спектра (800–14000 нм). При заражении растений наблюдается смещение местоположения красного края к более коротким длинам волн: тем сильнее, чем выше степень пораженности.

Влияние условий влажности на спектр отражения растительности

Рост и развитие растений непосредственно определяются условиями влажности. В ближней ИК и коротковолновой ИК-областях спектра существует пять полос поглощения (Zhang et al., 2010) воды растений, центрированных в 970, 1200, 1450, 1940 и 2500 нм (рис. 2e (Penuelas, 1999)). При этом чувствительность коэффициента отражения растений к содержанию воды наиболее высока в сильных полосах поглощения воды 1450, 1940 и 2500 нм коротковолновой ИК-области спектра. На полосу поглощения 1450 нм преобладающее влияние оказывает содержание воды растений, но на полосы поглощения 970, 1200 и 1900 нм также влияет содержание крахмала и белка растений (Zhang et al., 2010). С уменьшением содержания воды растений от полностью насыщенного до сухого состояния (рис. 2e (Penuelas, 1999)) коэффициент отражения возрастает во всей области спектра с постепенным исчезновением полос поглощения воды. Изменения коэффициента отражения в видимой области спектра также связаны с прогрессивной деградацией Chl вследствие высушивания. Однако норма изменения спектра отражения различается для разных видов растений — это обусловлено различием морфологии, структуры и содержания сухого вещества (Penuelas, 1999).

ОПТИМАЛЬНЫЕ УЗКИЕ КАНАЛЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

При анализе делимости шести зерновых культур (ячмень, пшеница, чечевица, нут, тмин и вика) и других категорий наземного покрытия (земель под паром и др.) в (Thenkabail, 2001) определены 16 оптимальных узких каналов в диапазоне 395–1010 нм (табл. 1): $\lambda_1 = 418$, $\lambda_2 = 461$, $\lambda_3 = 489$, $\lambda_4 = 518$, $\lambda_5 = 547$, $\lambda_6 = 575$, $\lambda_7 = 604$, $\lambda_8 = 661$, $\lambda_9 = 675$, $\lambda_{10} = 704$, $\lambda_{11} = 718$, $\lambda_{12} = 846$, $\lambda_{13} = 875$, $\lambda_{14} = 904$, $\lambda_{15} = 918$, $\lambda_{16} = 975$ нм. Наилучшие четыре канала: 547, 675, 718 и 904 нм. Наилучшие 12 каналов: 489, 518, 547, 575, 604, 661, 675, 704, 718, 846, 904, 975 нм.

При анализе делимости трех видов кустов, четырех видов травы, пяти видов сорняков и шести видов с.-х. культур в диапазоне 395–2500 нм в (Thenkabail et al., 2004) определены 22 оптимальных узких канала (при отсутствии упоминания ширина канала составляет 10 нм): $\lambda_1 = 495$, $\lambda_2 = 555$, $\lambda_3 = 645$ – 665 , $\lambda_4 = 675$ – 695 , $\lambda_5 = 705$, $\lambda_6 = 735$, $\lambda_7 = 885$, $\lambda_8 = 915$ – 935 , $\lambda_9 = 985$, $\lambda_{10} = 1085$, $\lambda_{11} = 1135$, $\lambda_{12} = 1215$, $\lambda_{13} = 1235$ – 1255 , $\lambda_{14} = 1275$ – 1285 , $\lambda_{15} = 1445$ – 1455 , $\lambda_{16} = 1675$ – 1705 , $\lambda_{17} = 1715$ – 1735 , $\lambda_{18} = 1985$ – 2015 , $\lambda_{19} = 2025$ – 2045 , $\lambda_{20} = 2235$, $\lambda_{21} = 2275$ – 2295 и $\lambda_{22} = 2315$ – 2345 нм (рис. 3, табл. 2 (Thenkabail et al., 2004)). Наилучшие четыре канала: 675, 1245, 2005 и 2345 нм. Наилучшие 11 каналов: 495, 675, 735, 1085, 1215, 1245, 1285, 1445, 2005, 2295, 2345 нм. Наилучшие 17 каналов: 495, 655, 675, 705, 735, 915, 1085, 1215, 1245, 1285, 1445, 1675, 2005, 2035, 2235, 2295 и 2345 нм.

Семь из 22 оптимальных узких каналов диапазона 350–2500 нм находятся среди 12 оптимальных узких каналов диапазона 395–1010 нм. Различия обусловлены главным образом разной шириной каналов (10 и 14.3 нм), расширением диапазона и видов растений.

Данные в диапазонах 1350–1440, 1790–1990 и 2360–2500 нм серьезно затронуты атмосферным поглощением, в диапазоне 350–390 нм — шумами. Вследствие этого данные указанных диапазонов в (Thenkabail et al., 2004; Thenkabail, 2001) исключены из анализа. При высокой частоте возникновения двух близких каналов проведены испытания избыточности (корреляция между каналами, с биомассой и др.). Если два канала обеспечивали чрезвычайно схожую информацию, выбирался более часто встречаемый канал (Thenkabail et al., 2004).

ОПТИМАЛЬНАЯ ШИРИНА УЗКИХ КАНАЛОВ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Данные узких каналов обычно характеризуются высоким уровнем шума. Это обусловлено тем, что узкая ширина позволяет захватить лишь очень небольшое количество энергии, которая к тому же находится под значительным влиянием переменного освещения Солнца и, как следствие, может быть подавлена собственными шумами сенсора. Поэтому необходимо избегать слишком узкой ширины спектральных каналов. Оптимальная ширина узких каналов должна сохранить особенности спектра, одновременно обеспечив отсутствие смещения местоположения локальных минимумов/максимумов, а также точек изгиба. Это означает необходимость нахождения компромисса между способностью разрешать спектральные детали и возможностью удаления шума.

Таблица 1. Оптимальные узкие каналы для дистанционного мониторинга состояния растительности в диапазоне 395–1010 нм

Центр канала, нм	Важность для дистанционного мониторинга состояния растительности
418	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 428 нм, плечо поглощения Ca _g в 425 нм
461	максимум поглощения Chl <i>b</i> в 453 нм, максимумы поглощений Ca _g в 455 и 480 нм
489	максимум поглощения Chl <i>b</i> в 453 нм, максимумы поглощений Ca _g в 455 и 480 нм
518	максимум положительного изменения наклона спектра отражения, чувствительность к содержанию Anth и хлоропласту
547	максимум коэффициента отражения в зеленой области спектра, сильная взаимосвязь с содержанием полного Chl, максимум поглощения Anth в 530 нм
575	максимум отрицательного изменения наклона спектра отражения, чувствительность к содержанию Anth и хлоропласту
604	максимум поглощения Chl <i>b</i> в 642 нм
661	максимум поглощения Chl <i>a</i> ; чувствительность к биомассе, индексу листовой поверхности LAI (leaf area index, LAI), фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
675	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 661 нм, наибольший контраст почва/растения; чувствительность к биомассе, LAI, фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
704	начало области красного края (начало значительного изменения спектра от высокого поглощения к высокому отражению), наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
718	центр области красного края – максимум изменения наклона спектра отражения в видимой и ближней ИК-областях спектра, наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
846	центр плеча максимума коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра, сильная корреляция с содержанием полного Chl
875	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра
904	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра для некоторых видов и/или фаз развития растений
918	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра в 920 нм
975	максимум поглощения воды в 970 нм
Ширина каналов – 14.3 нм.	

В (Ray et al., 2010) исследована ширина каналов в диапазоне 325–1075 нм для следующих с.-х. культур: рис, пшеница, кукуруза, просо, мелкий горошек, соя, горчица и хлопок. Данные каналов с шириной 3 нм имели высокий уровень шума, несколько меньшим шумом характеризуются данные каналов с шириной 5 нм (рис. 4а (Ray et al., 2010)). Значительное снижение шума начинается с ширины 10 нм. Однако при ширине 20–30 нм многие полосы поглощения сглаживаются, как может быть замечено в диапазоне 700–750 нм для первой производной спектра отражения риса (рис. 4б (Ray et al., 2010)).

Для диапазона 700–800 нм (включающего область красного края) более узкая ширина снижает среднеквадратическую ошибку (СКО). Для диапазонов 600–700 и 800–900 нм нет какого-либо изменения СКО до ширины каналов 15 нм (рис. 5 (Ray et al., 2010)). Для диапазонов 400–500 и 900–

1000 нм СКО не изменяется до ширины 25 нм, поскольку в этих диапазонах коэффициент отражения близок к однородному.

Таким образом, оптимальная ширина отличается для различных областей спектра. В области красного края и начала ближней ИК-области спектра оптимальная ширина является узкой (5–10 нм), тогда как в областях 500–700 и 800–900 нм она составляет до 25 нм.

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ДАННЫХ УЗКИХ И ШИРОКИХ КАНАЛОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Четыре узких канала в диапазоне 395–1010 нм (547, 675, 718 и 904 нм) значительно улучшают отделимость шести видов культур по сравнению с четырьмя широкими каналами сенсора Landsat TM

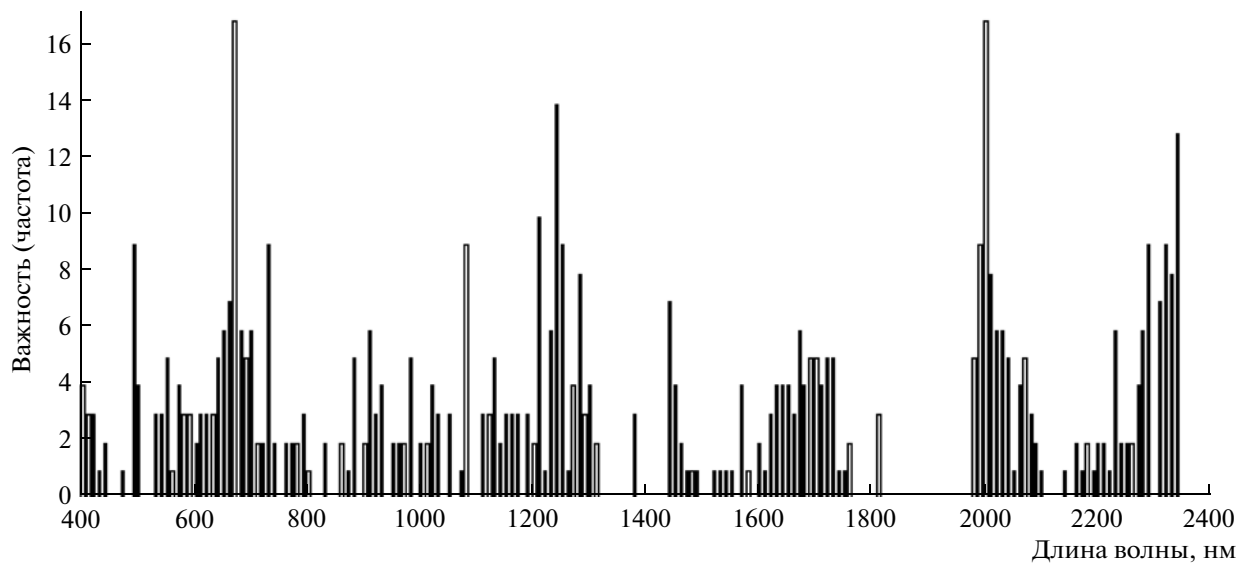


Рис. 3. Важность узких каналов для дистанционного мониторинга состояния растительности в диапазоне 350–2500 нм (определена на основании анализа главных компонент, корреляционного анализа и пошагового дискриминантного анализа).

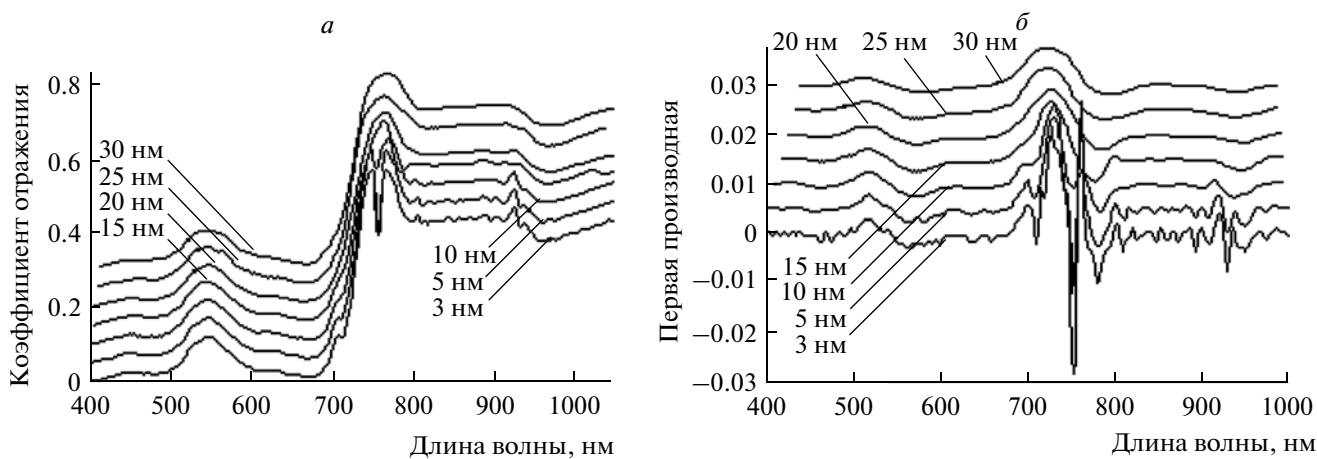


Рис. 4. Влияние ширины каналов на: *a* – спектр отражения; *б* – первую производную спектра отражения для риса с нормой внесения азота = 180 кг/га (спектры отображены со смещением по вертикали).

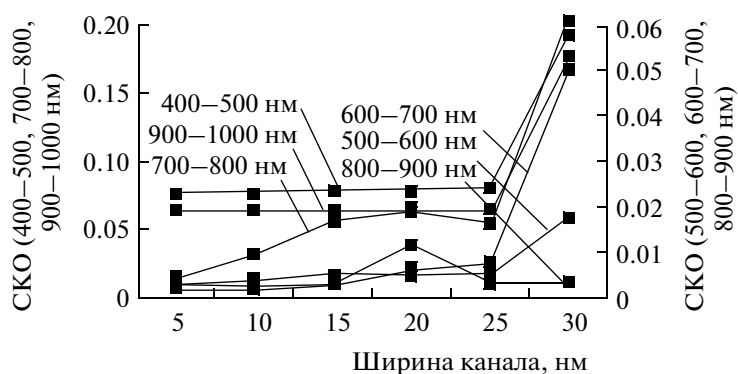


Рис. 5. Зависимость среднеквадратической ошибки коэффициента отражения от ширины каналов для различных областей спектра.

Таблица 2. Оптимальные узкие каналы для дистанционного мониторинга состояния растительности в диапазоне 350–2500 нм

Центр канала, нм	Важность для дистанционного мониторинга состояния растительности
495	чувствительность к старению, Саг и фону почвы
555	максимум коэффициента отражения в зеленой области спектра, чувствительность к содержанию полного Chl и N
655	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 661 нм; чувствительность к биомассе, LAI, фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
675	максимум поглощения Chl <i>a</i> в 661 нм, наибольший контраст почва/растения в диапазоне 350–2500 нм для многих видов растений в большинстве фаз развития; чувствительность к биомассе, LAI, фону почвы, структуре покрова, N, влажности, виду и стрессу растений
705	начало быстрого изменения наклона спектра отражения, наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
735	окончание быстрого изменения наклона спектра отражения, наибольшая чувствительность к стрессу растений, дополнительная информация о содержании Chl и N
885	предмаксимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра; чувствительность к содержанию полного Chl, биомассе, LAI и белку
915	максимум коэффициента отражения в ближней ИК-области спектра; чувствительность к содержанию полного Chl, биомассе, LAI и белку
985	максимум поглощения воды в 970 нм; в этом канале выполнимы прямые измерения содержания пара воды в и по покрову растительности
1085	1-й максимум коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1135	пост 1-го максимума коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1215	максимум поглощения воды в 1200 нм
1245	пред 2-го максимума коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1285	2-й максимум коэффициента отражения в диапазоне 1050–1300 нм, чувствительность к биомассе и LAI
1445	максимум поглощения воды в 1450 нм
1675	1-й максимум коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к лигнину, биомассе и крахмалу
1725	пост 2-го максимума коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к биомассе, целлюлозе и лигнину
2005	1-й максимум поглощения воды в диапазоне 1900–2350 нм
2035	2-й максимум поглощения воды в диапазоне 1900–2350 нм
2235	2-й максимум коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к лигнину, биомассе и крахмалу
2295	2-й максимум коэффициента отражения в средней ИК-области спектра; чувствительность к фону почвы и стрессу растений
2345	2-й максимум поглощения в средней ИК-области спектра; чувствительность к стрессу растений, лигнину и крахмалу

Ширина каналов – 10 нм.

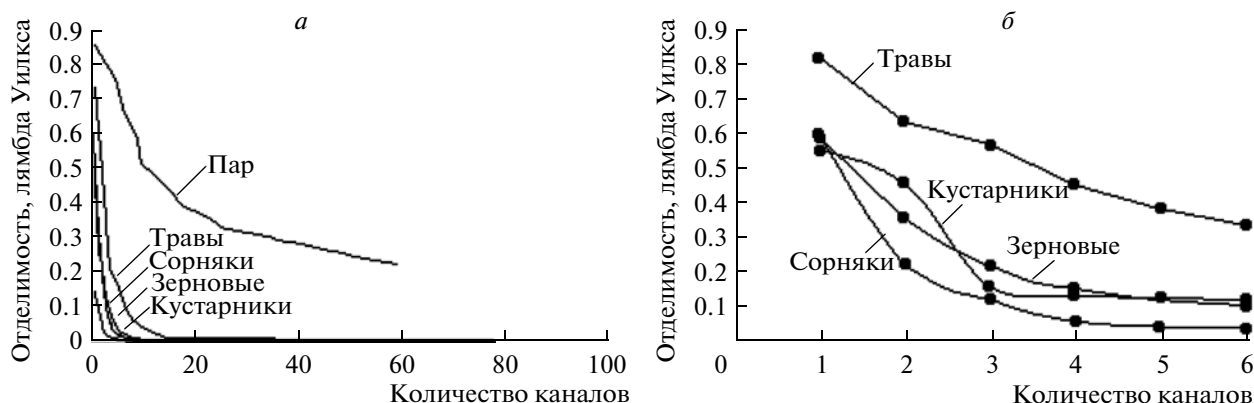


Рис. 6. Отделимость культур (чем меньше значение лямбда Уилкса, тем выше отделимость): а – узкие каналы; б – широкие каналы сенсора Landsat TM.

(485, 560, 665 и 830 нм) и обеспечивают такую же отделимость, как и шесть широких каналов (с каналом в средней ИК-области спектра) (Thenkabail, 2001). Это показывает преимущество узких каналов в определенных областях спектра. Отделимость значительно улучшается с увеличением количества узких каналов до 12, и в меньшей степени – при дальнейшем увеличении каналов до 16. Улучшение отделимости становится близким к асимптотическому (статистически незначим) при использовании более 16 каналов. Таким образом, 12–16 узких каналов могут обеспечить оптимальную отделимость видов культур.

Дополнение двух широких каналов средней ИК-области спектра (ТМ5 и ТМ7) к четырем каналам видимой/ближней ИК-областей спектра (ТМ1, ТМ2, ТМ3 и ТМ4) значительно увеличивает точность классификации (на 10%). Это – обещающая особенность, которая подразумевает, что дополнение определенных каналов средней ИК-области спектра к каналам видимой/ближней ИК-областей спектра увеличивает отделимость и точность классификации культур (Thenkabail, 2001). Шесть узких каналов обеспечивают значительно лучшую точность классификации четырех зерновых культур (ячмень, чечевица, вика и пшеница) по сравнению с шестью широкими каналами сенсора Landsat TM. Однако для таких культур, как нут и тмин, шесть широких каналов сенсора Landsat TM обеспечивают большую точность, чем шесть узких каналов. Это обусловлено наличием каналов средней ИК-области спектра (ТМ5 и ТМ7), которые наиболее полезны в отношении культур с комплексными эффектами фона почвы, сухой и зеленой биомассы. Тмин и нут (доля покрова 48 и 69%) характеризовались низкими уровнями биомассы в фазе старения и наибольшим эффектом фона почвы.

Точность классификации зерновых культур значительно возрастает с увеличением количе-

ства узких каналов до 12, после чего увеличение характеризуется низкой нормой. Например, при использовании 12 узких каналов точность возрастает до 80% для таких зерновых культур, как ячмень (84.1%), нут (85.7%), тмин (100%), пшеница (82.2%), и более 60% для чечевицы (65.2%) и вики (64.3%). С увеличением количества каналов с 12 до 16 точность классификации остается почти такой же, как для 12 каналов. Точность классификации превышает 90% для всех зерновых культур кроме вики (85.7%) только при использовании 43 каналов. Эти каналы охватывают весь диапазон 395–1010 нм, тогда как 12 каналов выбраны в наиболее чувствительных областях данного диапазона и позволяют исключить избыточность каналов.

Узкие каналы определенных областей спектра имеют большую чувствительность к биофизическим характеристикам. Так, ширококанальный индекс (вычисленный с использованием каналов ТМ2 и ТМ3) имеет значения $r^2 = 0.50$ с LAI и 0.51 с влажной биомассой. Соответствующий узкоканальный индекс (вычисленный с использованием каналов 550 и 680 нм шириной 15 нм) имеет значение $r^2 = 0.67$ с LAI и влажной биомассой (Thenkabail, 2001).

Почти полная отделимость культур в диапазоне 350–2500 нм (Thenkabail et al., 2004) достигнута между 11 и 20 узкими каналами (рис. 6а). При количестве каналов более 14 отделимость возрастает лишь незначительно. При количестве каналов более 20 отделимость приобретает асимптотический характер, кроме видов земель под паром. Для них отделимость относительно низка даже при использовании 26 каналов. Спектральные данные для пара составлены из более 25 видов – такое высокое разнообразие и обусловило низкую отделимость. Напротив, даже при использовании всех шести широких каналов сенсора Landsat TM отделимость значительно ниже по

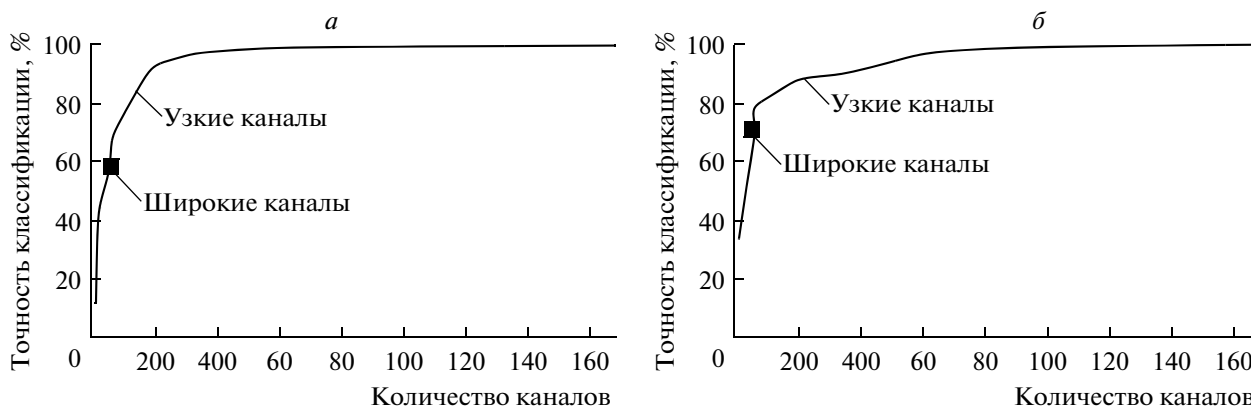


Рис. 7. Точность классификации: а – пяти видов сорняка; б – шести видов зерновых культур.

сравнению с узкими каналами (рис. 6б (Thenkabail et al., 2004)).

Для первых 10–15 каналов точность классификации всех видов культур в (Thenkabail et al., 2004) быстро возрастает с каждым дополнительным каналом, достигая плато (около 94%), как правило, между 13 и 22 каналами. Так, при классификации пяти видов сорняка точность увеличилась с 56% для трех каналов, до 72% – для семи каналов, до 90% – для 13 каналов и до 98% – для 22 каналов (рис. 7а (Thenkabail et al., 2004)). То есть лучшие 22 узких канала обеспечивают почти максимальную точность классификации. Для зерновых культур 13 каналов обеспечили точность 90%, но требовалось более 50 каналов для достижения 98% (рис. 7б (Thenkabail et al., 2004)), – отражая пределы возможностей гиперспектральных данных.

Наибольшее увеличение точности 15% было при добавлении каналов диапазона 1051–1300 нм (к каналам диапазона 350–1050 нм): 1085, 1135, 1215, 1245 и 1285 нм, далее 8% при добавлении каналов диапазона 1300–2500 нм: 1445, 1675, 1725, 2005, 2035, 2235, 2295, 2345 нм. Вместе с тем ролью каналов диапазона 1051–2500 нм удивительно пренебрегают в большинстве сенсоров, тогда как использование узких каналов в этом диапазоне может улучшить дистанционный мониторинг состояния растительности за счет обеспечения дополнительной информации, не доступной в каналах диапазона 300–1050 нм (Thenkabail et al., 2004).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектры отражения большинства видов растительности замечательно идентичны из-за схожести в химическом составе и структуре. В результате множество различных факторов (заморозки, болезни, условия влажности, выпадение града и др.) вызывают очень схожие изменения спектра отражения и смещение местоположения

красного края. Поэтому, несмотря на то, что данные ДЗЗ позволяют обнаруживать изменения состояния растительности, их специфическая причина не всегда может быть определена исключительно из данных ДЗЗ. В этой связи, используется вспомогательная информация (как правило, наземная – погодные условия, фаза развития, севооборот и др.).

В диапазоне 395–1010 нм оптимальными для дистанционного мониторинга состояния растительности являются следующие 16 узких каналов (ширина канала 14.3 нм): $\lambda_1 = 418$, $\lambda_2 = 461$, $\lambda_3 = 489$, $\lambda_4 = 518$, $\lambda_5 = 547$, $\lambda_6 = 575$, $\lambda_7 = 604$, $\lambda_8 = 661$, $\lambda_9 = 675$, $\lambda_{10} = 704$, $\lambda_{11} = 718$, $\lambda_{12} = 846$, $\lambda_{13} = 875$, $\lambda_{14} = 904$, $\lambda_{15} = 918$, $\lambda_{16} = 975$ нм. Наилучшие четыре канала: 547, 675, 718 и 904 нм. В диапазоне 395–2500 нм оптимальными являются следующие 22 узких канала (при отсутствии упоминания ширина канала составляет 10 нм): $\lambda_1 = 495$, $\lambda_2 = 555$, $\lambda_3 = 645–665$, $\lambda_4 = 675–695$, $\lambda_5 = 705$, $\lambda_6 = 735$, $\lambda_7 = 885$, $\lambda_8 = 915–935$, $\lambda_9 = 985$, $\lambda_{10} = 1085$, $\lambda_{11} = 1135$, $\lambda_{12} = 1215$, $\lambda_{13} = 1235–1255$, $\lambda_{14} = 1275–1285$, $\lambda_{15} = 1445–1455$, $\lambda_{16} = 1675–1705$, $\lambda_{17} = 1715–1735$, $\lambda_{18} = 1985–2015$, $\lambda_{19} = 2025–2045$, $\lambda_{20} = 2235$, $\lambda_{21} = 2275–2295$ и $\lambda_{22} = 2315–2345$ нм. Наилучшие четыре канала: 675, 1245, 2005 и 2345 нм. Различия между оптимальными каналами диапазонов 350–2500 и 395–1010 нм обусловлены главным образом разной шириной каналов и расширением диапазона. Оптимальная ширина спектральных каналов отличается для разных областей спектра. В области красного края и начала ближней ИК-области спектра оптимальная ширина составляет 5–10 нм, тогда как в областях 500–700 и 800–900 нм – до 25 нм.

Узкие каналы определенных областей спектра имеют большую чувствительность (чем широкие каналы) к биофизическим характеристикам растительности, улучшают отделимость и точность классификации ее видов. Значительное улучшение может быть достигнуто с использованием

большого количества каналов видимой/ближней ИК-областей спектра, либо с использованием меньшего количества каналов видимой/ближней ИК/средней ИК-областей спектра.

Важность каналов определенных областей спектра для дистанционного мониторинга состояния растительности признана их включением в последовательность специализированных (разработанных для приложений сельского хозяйства) сенсоров нового поколения. Так, в сенсор WorldView-2 MS помимо традиционных спектральных каналов (450–510, 510–580, 630–690, 770–895 нм) включены четыре дополнительных: 400–450, 585–625, 700–730, 860–1040 нм. А в сенсорах RapidEye MS дополнительно к традиционным каналам (440–510, 520–590, 630–690, 760–880 нм) включен канал области красного края 690–730 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Apan A., Chandler O., Young F., Maraseni T.* Opportunities and limitations of remote sensing for crop loss (hail damage) assessment in the insurance industry // Proc. SSC 2005 Spatial Intelligence, Innovation and Praxis. Melbourne, Australia, 2005. P. 19–28.
- Asner G.P.* Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance // Rem. Sens. Environ. 1998. V. 68. P. 234–253.
- Ayala-Silva T., Beyl C.A.* Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency // Adv. Space Res. 2005. V. 35. № 2. P. 305–317.
- Blackburn G.A.* Hyperspectral remote sensing of plant pigments // J. Exp. Botany. 2007. V. 58. № 4. P. 855–867.
- Bravo C.* Automatic foliar disease detection in winter wheat // Ph. D. Diss.: Katholieke Universiteit Leuven Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen. Leuven, Belgium, 2006. 258 p.
- Chandler O., Apan A., Pullinger R., Bullen B.* Quantifying hail damage for crop loss assessment: Techniques using remote sensing and geographic information systems // Proc. 11th Australian Rem. Sens. and Photogram. Conf. Brisbane, 2002. P. 412–421.
- Chandler O., Young F.R., Apan A.* Assessment of hail damage to crops using satellite imagery and handheld hyperspectral data // Proc. 12th Australian Rem. Sens. and Photogram. Conf. Fremantle, 2004. 10 p.
- Franke J.* Spatiotemporal dynamics of stress factors in wheat analysed by multisensoral remote sensing and geostatistics // Ph. D. Diss.: Universitaets und Landesbibliothek Bonn, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Bonn, Germany, 2007. 150 p.
- Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N.* Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves // Am. J. Botany. 2009. V. 96. № 10. P. 1861–1868.
- Gröll K.* Use of sensor technologies to estimate and assess the effects of various plant diseases on crop growth and development // Ph. D. Diss.: Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften. Stuttgart, Germany, 2008. 183 p.
- Li Z.-C., Zhou Q.-B., Lü X., Lin H.-R., Li S.* Hyperspectral features of winter wheat after frost stress at jointing stage // Acta Agronom. Sin. 2008. V. 34. № 5. P. 831–837.
- Merzlyak M.N., Chivkunova O.B., Solovchenko A.E., Naqvi K.R.* Light absorption by anthocyanins in juvenile, stressed, and senescing leaves // J. Exp. Botany. 2008. V. 59. № 14. P. 3903–3911.
- Penuelas J.* Reflectance indices indicative of changes in water and pigment contents of peanut and wheat leaves // Photosynthetica. 1999. V. 36. № 3. P. 355–360.
- Ray S.S., Jain N., Miglani A., Singh J.P., Singh A.K., Panigrahy S., Parihar J.S.* Defining optimum spectral narrow bands and bandwidths for agricultural applications // Curr. Sci. 2010. V. 98. № 10. P. 1365–1369.
- Steddom K., Jones D., Rush C.* A picture is worth a thousand words // Am. Phytopathol. Soc. Saint Paul, USA, 2005. 7 p.
- Stilwell A.R.* Remote sensing to detect the movement of wheat curl mites through the spatial spread of virus symptoms, and identification of thrips as predators of wheat curl mites // Ph. D. Diss.: University Nebraska, Lincoln, USA, 2009. 192 p.
- Thenkabail P.S., Enclona E.A., Ashton M.S., Van Der Meer B.* Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications // Rem. Sens. Environ. 2004. V. 91. № 3–4. P. 354–376.
- Thenkabail P.S.* Optimal hyperspectral narrowbands for discriminating agricultural crops // Rem. Sens. Rev. 2001. V. 20. № 4. P. 257–291.
- Ustin S.L., Gitelson A.A., Jacquemoud S., Schaepman M., Asner G.P., Gamon J.A., Zarco-Tejada P.* Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy // Rem. Sens. Environ. 2009. V. 113. P. 67–77.
- Wrolstad R.E.* Current protocols in food analytical chemistry. John Wiley & Sons Inc, 2000. 1000 p.
- Xiaoping W., Zhang G.N., Hong K.Z.* Hyperspectral reflectance and their relationships with spring wheat growth status characteristics in rained agricultural areas of Loess Plateau // Proc. Photogram. Rem. Sens. and Spatial Inf. Sci. (ISPRS). Beijing, China, 2008. V. 37. Part B7. P. 403–408.
- Young F.R., Apan A., Chandler O.* Crop hail damage: insurance loss assessment using remote sensing // Proc. Rem. Sens. and Photogram. Society Annual Conf. (RSPSoc2004). Aberdeen, UK, 2004. 10 p.
- Zhang J.H., Xu Y., Yao F.M., Wang P.J., Guo W.J., Li L., Yang L.M.* Advances in estimation methods of vegetation water content based on optical remote sensing techniques // Sci. China Ser. E-Tech. Sci. V. 53. № 5. 2010. P. 1159–1167.
- Zur Y., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N.* The spectral contribution of carotenoids to light absorption and reflectance in green leaves // Proc. 2nd Int. Conf. Geospatial Information in Agriculture and Forestry. Buena Vista, 2000. V. 2. P. 17–23.

Optimal Spectral Channels of Aerospace Equipment for Vegetation Remote Sensing Monitoring (Foreign Publications Review by the Problem)

S. L. Kravtsov, D. V. Golubtsov, A. M. Lisova

United Institute of Informatics Problems, Belarus, Minsk

The basic pigments of plants, the biophysical and biochemical factors determining absorption and reflection spectra of vegetation are characterized. Influence of growth stage, deficiency of mineral elements, frosts, diseases, hail damage and conditions of humidity on a vegetation reflection spectrum is considered. Optimal narrow spectral channels in the ranges of 395–1010 and 350–2500 nm, and also their width are presented for vegetation remote sensing monitoring. Comparison the data of narrow and wide channels for vegetation remote sensing monitoring is made. This work is correspond systematization of foreign publications by the stated questions.

Keywords: optimal spectral channels, remote sensing monitoring, vegetation