

В. В. Донец¹, А. А. Броварец², В. В. Бровченко¹

¹ Корпорація «Науково-виробниче об'єднання «Арсенал», Київ

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛЕВОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Представлен анализ особенностей полевой спектральной аппаратуры, созданной начиная с 1930-х гг. для исследования земной поверхности и наземных объектов, а также для подспутниковой валидации спектрометрических данных. Достижения передовых технологий, которые были разработаны и апробированы в полевых спектрометрах, были и будут в дальнейшем внедрены в ряд бортовых спектрометров разного применения.

ВСТУПЛЕНИЕ

Спектральную отражательную способность земной поверхности, ее покрытия, в том числе лесов и полей, в СССР начал Е. Л. Кринов [8–11] еще в 1930-е гг. Для спектрографирования природных образований использовались полевые спектрографы [11]: кварцевый спектрограф А. Хилгера, стеклянный спектрограф НИЛ, стеклянный спектрограф ЦНИИГАиК и двухпризмный спектрограф ЦНИИГАиК для инфракрасной области спектра. На одной фотографической пластинке 3×6.5 см при ширине спектрограмм в 1 мм могло помещаться до 11 спектрограмм.

При спектрографировании горизонтально расположенных поверхностей спектрограф, укрепленный на штативе, направлялся на поверхность вертикально (в надир) или же под углом 45° и азимуте 90° относительно Солнца. При таких условиях имело место наименьшее влияние зеркального отражения тех образований, которые им вообще обладали. Эталонная поверхность располагалась горизонтально. Спектрограф направлялся на эталонную поверхность под тем же углом и в том же азимуте, как и при спектрографировании изучаемого образования.

В качестве эталонной поверхности использовалась гипсовая пластинка [11]. Она имела размеры 10×10 см и толщину 1 см. Эта пластинка была приготовлена из химически чистого гипса

с 10 % содержанием порошка магнезии (карбоната магния — $MgCO_3$). Лишь с 1937 г. стала применяться баритовая бумага, представляющая собой подложку фотографической бромосеребряной бумаги [11], покрытой несколькими слоями желатина с серноокислым барием $BaSO_4$.

ПОЛЕВОЙ СПЕКТРОГРАФ

В 1956 г. по заданию Лаборатории аэрофотометодов МГУ мастерскими ЛИТМО был изготовлен летный спектрограф ЛС-2 [5]. Он предназначался как для наземной работы в полевых условиях, так и с воздуха — с самолета или вертолета. В наземных условиях этот прибор работает от аккумуляторов, а в самолете питается от бортовой сети. В полевом варианте прибора имеется специальный штатив с градуированной головкой, обеспечивающей поворот спектрографа вокруг вертикальной оси на 360° и наклон от 0 до 90° (рис. 1).

Спектрограф ЛС-2 — двухканальный: один из каналов обеспечивает дисперсию в диапазоне 420–630 нм, другой — 620–800 нм. Отличие каналов (как видно из рис. 2) — только в угле разворота спектральных призм.

Фотографирование обеих частей спектра производится одновременно на две различные фотопленки. Диспергирующими системами служат стеклянные призмы.

Спектрограф состоит из камеры 1 и съемной кассеты 2 (рис. 3). В камере 1 расположены вход-



Рис. 1. Подспутниковые наблюдения с полевым спектрометром ЛС-2 на высокогорном полигоне (Терскол, Приэльбрусье, 1979 г.)

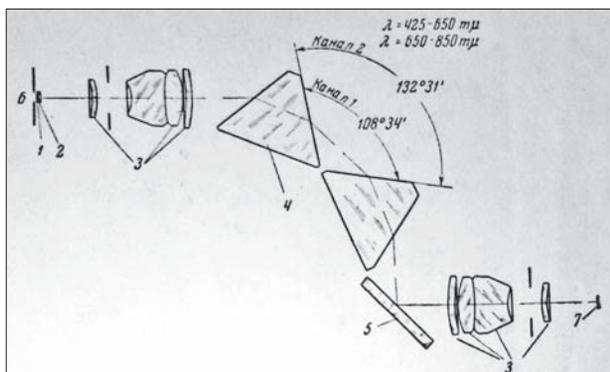


Рис. 2. Оптическая схема спектрографа ЛС-2 [5]

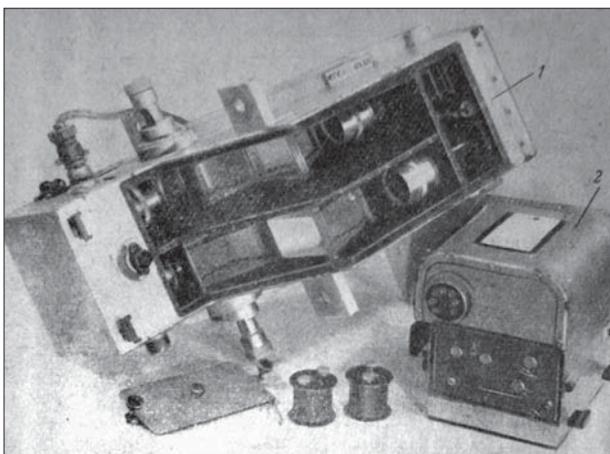


Рис. 3. Спектрограф ЛС-2 (видны оба канала) [5]

ные щели, затвор и вся оптическая часть прибора. В кассете 2 расположены два светонепроницаемых пенала, куда заряжаются фотопленки шириной в 35 мм, длиной до 2 м, на которых помещается по 140 спектрограмм.

Прибор работает полуавтоматически с включением от руки для единичных кадров и автоматически от командного прибора — при непрерывном спектрографировании. Первый способ используется при наземных работах, второй — в воздухе.

РАННИЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ

После запуска на орбиту в 1972 г. спутника «Landsat-1» (США) с установленной на его борту аппаратурой MSS (Multispectral Scanner System), которая позволяла вести съемку в четырех спектральных диапазонах, ширина каждого из которых составляла около 100 нм [16], стал вопрос о наземной заверке его результатов измерений.

Для этих целей были созданы полевые спектральные приборы. Первым из них был спектро-радиометр «Exotech» модели 20-B [32], изготовлен в 1973 г. фирмой «Exotech Inc». Этот прибор измеряет интенсивность падающего и отраженного излучения в спектральном диапазоне от 0.37 до 2.52 мкм и интенсивность излучения в спектральном диапазоне от 2.76 до 13.88 мкм.

В полевых условиях периодическую калибровку спектро-радиометров «Exotech» моделей 20-B и 20-C проводили, используя стандартизованную пластину, окрашенную сульфатом бария ($BaSO_4$) [46] с известными отражательными свойствами.

Полевые спектрометры могут быть выполнены как на основе спектральных систем с дифракционными решетками или спектральными диспергирующими призмами, так и на основе узкополосных интерференционных фильтров. Так, в работе [40] описан многополосный фильтровый полевой спектро-радиометр, который позволяет одновременно регистрировать аналоговые сигналы, пропорциональные яркости исследуемой сцены в восьми спектральных диапазонах. Прибор устанавливается на поворотной подъемной штанге, штативе, в вертолете или небольшом самолете.

Спектрорадиометр имеет стандартный набор (семь) спектральных диапазонов, которые соответствуют полосам мультиспектрального сканера «Маррег», запущенного в 1981 г. Положение исследуемых спектральных полос спектрорадиометра и сканера показано на рис. 4.

Конструкция фильтров выполнена прочной и защищенной для работы в полевых условиях при температуре от 0 до 60 °С и повышенной влажности.

Для регистрации коэффициентов спектрального отражения в неразрывном спектральном диапазоне в полевых условиях был создан спектрорадиометр «Exotech 20C-SW» (рис. 5) [20, 45]. В нем используются четыре круговые переменные по длине волны фильтра с двумя модулями детекторов (кремниевым и на основе сульфида свинца PbS (рис. 5, б)). Рабочий диапазон длин волн прибора: 0.4—2.4 мкм. Спектральное разрешение $\delta\lambda/\lambda = 0.02—0.03$. Так, на $\lambda = 2200$ нм $\delta\lambda = 44$ нм, что является слишком низким для практической полевой спектроскопии.

ПОРТАТИВНЫЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ОТРАЖЕНИЯ JPL NASA

Портативный спектрометр PFRS. Хотя в мультиспектральных дистанционных исследованиях поверхности Земли (особенно на их начальной стадии в 1970-х гг.) доминирует низкая спектральная разрешающая способность измерений, все время возникал постоянный интерес к измерениям с более высоким спектральным разрешением, особенно в полевых условиях. К 1974 г. А. Гетц [45] был ведущим исследователем первого мультиспектрального сканера MSS, установленного на спутнике «Landsat-1». Обработка спектральных результатов изображений со сканера MSS показала тонкие изменения в почве на плато Сосопино к югу от Гранд-Каньон, которые не могли быть замечены на земле. Эти минералогические изменения в богатой железом почве были видны четче с помощью MSS в четвертой зоне — в ближней спектральной области (NIR), т. е. только за пределами видимого «красного края». Это привело к необходимости создания портативного полевого спектрометра отражения PFRS в лаборатории JPL NASA.

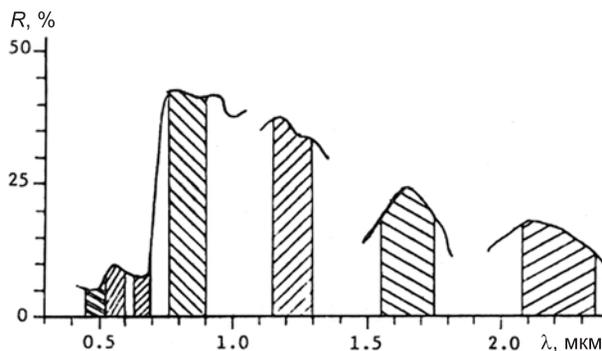
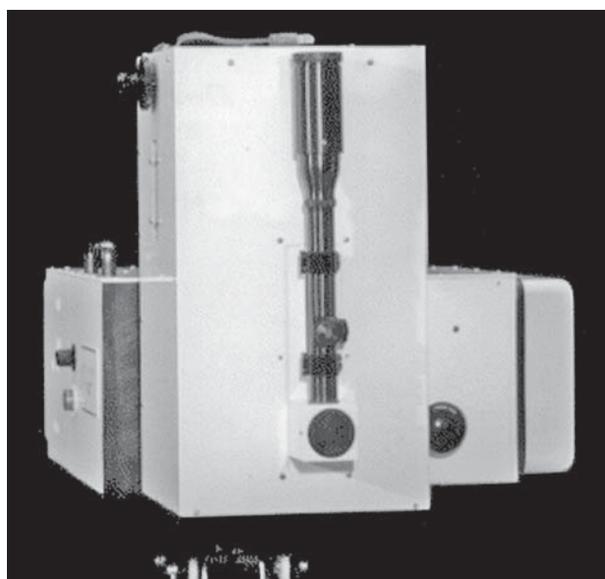
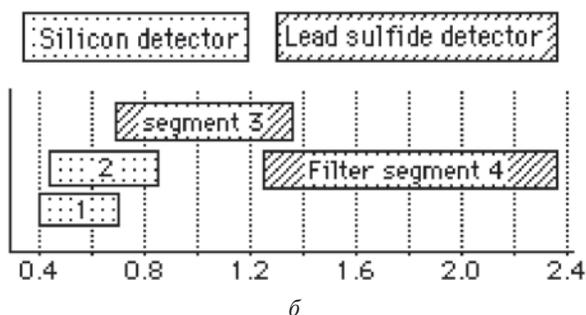


Рис. 4. Спектральное распределение полосы пропускания накладывается на типичный спектр растительности [40]



а



б

Рис. 5. Спектрорадиометр «Exotech 20C-SW» [20]: внешний вид (а) и перекрытие рабочего диапазона 0.4—2.4 мкм (б)

Портативный полевой спектрометр отражения PFRS (Portable Field Reflectance Spectrometer) был разработан Абрамсом и А. Гетцом в 1974 г. [19, 27, 28, 37] и предназначался для наземного уточнения результатов дистанционных исследований Земли.

Этот прибор регистрирует спектральный коэффициент отражения естественной поверхности (по отношению к спектральному коэффициенту отражения стандартной поверхности) в диапазоне длин волн от 0.45 до 2.5 мкм с умеренным разрешением ($\Delta\lambda/\lambda = 0.04$ от 0.45 до 0.7 мкм и $\Delta\lambda/\lambda = 0.015$ от 0.7 до 2.5 мкм), используя Солнце в качестве источника света. Каждый спектр регистрировался в течение 30 с.

Прибор PFRS содержит оптическую головку, установленную на штативе, и электронный блок в рюкзаке. В оптической головке расположены входная оптика, вращающиеся круговые переменные по длинам волн фильтры и охлаждаемый детектор — фоторезистор (ФР) на основе сульфида свинца PbS.

В то время микропроцессоры были еще недоступны. Поэтому электронный блок PFRS не имел возможности мгновенного отображения результатов для анализа, но имел возможность с помощью АЦП преобразовывать аналоговый сигнал от ФР в цифровой и записывать его для последующего анализа на компактные цифровые кассеты (около 200 спектров в день). Полученные таким образом данные в дальнейшем дополнительно обрабатывались с помощью программируемого цифрового компьютера. Недостаток всей этой системы PFRS — невозможность идентификации минералов на месте, что создавало проблемы при сопоставлении данных.

В качестве эталонного образца сравнения использовался Fibergrax — белый керамический материал, который легко очищался и позволял создать чистые диффузно отражающие поверхности в рабочей спектральной области [45].

Портативный полевой спектрометр PIDAS. Для того чтобы уменьшить время сбора данных при полевых измерениях, в Jet Propulsion Laboratory (JPL) NASA в 1984 г. был разработан портативный быстродействующий полевой спектрометр отображения и анализа PIDAS (Por-

table Instant Display and Analysis Spectrometer) [2, 26, 38, 45], в основу которого легла компактная конструкция прибора с составными дифракционными решетками в виде вращающихся дисков, успешно примененная разработчиками гиперспектрометров AIS-1 и AIS-2 [2].

Несмотря на использование имеющихся на то время передовых технологий, созданный прибор весил 31 кг, что вызывало трудности работы с ним.

Полевой спектрометр PIDAS имел три составных дифракционных спектрометра, помещенных в сосуд с инертным газом. В качестве охлаждаемых фотоприемных устройств использовались: 512-элементный линейный кремниевый фотоприемник в сочетании с двумя 36-, а затем 45-элементными фотоприемными линейными массивами на основе сульфида цинка (PbS), обеспечивающими считывание за несколько секунд в 872 точках в пределах общего рабочего спектрального диапазона от 400 до 2500 нм со спектральным разрешением $\delta\lambda = 4.7$ нм. Ручной дисплей с ЖК-экраном позволял отображать текущий спектр и накладывать его на другие. В памяти прибора может обрабатываться и храниться до 288 спектров (128 постоянно хранятся в библиотеке спектров).

В полевом спектрометре PIDAS впервые использовались не только цифровое отображение спектров отражения на ЖК-экране в режиме реального времени, а и волоконно-оптический ввод в составные спектрометры прибора оптического сигнала от исследуемой зоны (используя уникальные оптические волокна на основе фторидов).

Полевые приборы для измерения отражения могут быть переносными, устанавливаться на треногах, кронштейнах, в ранцах и др. специальных подвесках, даже на велосипедах («Рефлектомобиль» лаборатории JPL NASA) [36, 37].

Полевой спектрофотометр СПА-1. В Агрофизическом институте (г. Санкт-Петербург, Россия) в 1983 г. был изготовлен полевой автоматический спектрофотометр СПА-1, разработанный в Лаборатории аэрометодов (Р. Л. Кирмалов с соавторами) производственного геологического объединения «Аэрогеология» [7, 14].

Этот прибор предназначен для автоматического измерения в полевых условиях коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) природных объектов в естественном и поляризованном свете, углового распределения поля отражения, а также спектральных контрастов между объектами.

Спектрофотометр СПА-1 построен по двух-лучевой схеме [14] (рис. 6), на выходе которого индицируются непосредственно величины КСЯ исследуемого объекта относительно эталона 1 — белой баритовой бумаги (которая с точностью до множителя 0.85 может рассматриваться как идеальный рассеиватель) последовательно в фиксированных узких спектральных зонах.

Оптическая система прибора имеет два выходных коллиматора 8 для приема лучистых потоков соответственно от объекта и эталона 1 и один выходной коллиматор 12.

Излучение, отраженное от объекта исследования и эталона 1, проходит поляризатор 2, защитное стекло 3 и направляется с помощью зеркал 4 через анализаторы 5, входные спектральные щели 6, диафрагмы 7 и коллиматоры 8 на сканирующее зеркало 9, которое вращается вокруг оси 10, переключая каналы и обеспечивает прохождение спектра путем изменения угла падения светового потока (параллельного после коллиматоров 8) на дифракционную решетку 11. Дифрагированное излучение проходит объектив 12 и попадает на плоскость выходных щелей 13, которые и выделяют два монохроматических потока излучения с центрами на определенных длинах волн λ_1 и λ_2 . Далее оба эти излучения проходят через светофильтры 14 для отрезания спектров высших порядков и с помощью световодов 15 попадают на вход фотоприемников 16. Фотоприемниками 16 служат фотоэлектронные умножители ФЭУ-51 (для области спектра 0.4—0.6 мкм) и ФЭУ-62 (для области спектра 0.6—0.9 мкм).

Для измерения КСЯ в поляризованном свете оба канала прибора снабжены съемными поляроидами (поляризатором 2 и анализатором 5), плоскость поляризации которых может быть ориентирована в трех фиксированных положениях: (0, 60 и 120°).

Основные технические параметры прибора СПА-1 [7, 14] приведены в сравнительной таблице.

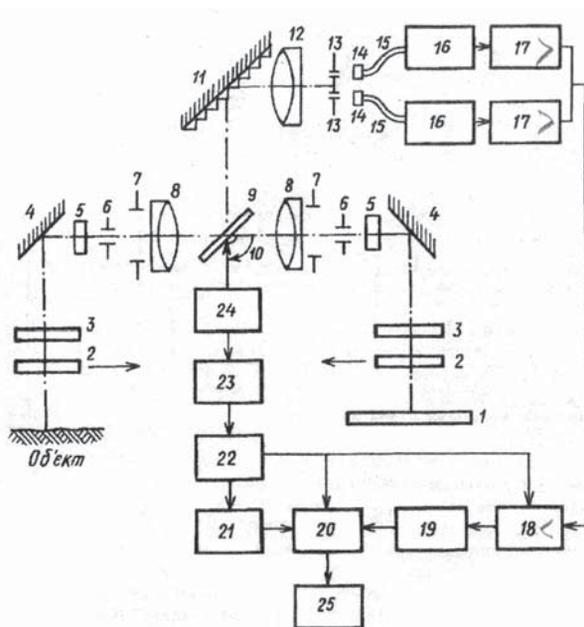


Рис. 6. Блок-схема спектрофотометр СПА-1 (пояснение в тексте) [14]

Спектрорадиометр с рабочим диапазоном в интервале длин волн 400—1900 нм был создан в Японии [42] в 1987 г. для сбора данных об отражательных свойствах посевов риса. Измерительная система включает в себя два монохроматора на дифракционных решетках с детекторами, которые работают одновременно. За 22 с происходит сканирование в диапазонах 400—900 нм и 900—1900 нм. Пара кварцевых оптических волокон длиной 10 м (расположенных на длинном поворотном кронштейне) используется в качестве световода для облегчения полевых измерений. Эта система была использована для оценки спектральных факторов отражательной способности риса, оценке надземной общей сухой массы и урожая зерна.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ

В настоящее время лидирующие позиции по полевым спектрометрам занимает фирма ASD, США (Analytical Spectral Devices, Inc.), главным конструктором-исследователем которой является А. Гетц [29, 34, 45]. За время своего существования фирмы ASD (с 1990 г.), были созданы десятки конструкций спектрометрической ап-

паратуры различного назначения, в том числе и полевых [18, 21—23, 31], которые используются для измерений и исследований на всех континентах, в более чем 1000 научно-исследовательских учреждениях и более чем в 70 странах мира.

Последней серийной конструкцией полевого спектрального прибора является «FieldSpec-4» [18, 22, 28], который пришел на смену зарекомендовавшему себя его предшественнику — «FieldSpec-3» [21]. 4-я серия «FieldSpec» включает в себя три модели спектрорадиометров: «FieldSpec-4-Wide-Res», «FieldSpec-4-Standard-Res» и «FieldSpec-4-Hi-Res» с оптоволоконным кабелем для ввода исследуемого оптического сигнала. Все они имеют дополнительные входные устройства.

Спектрорадиометры «FieldSpec-3» и «FieldSpec-4» имеют по три составных датчика (полихроматора на дифракционных решетках с линейными массивами фотоприемников).

Схема с использованием трех датчиков, используемая в спектрорадиометрах ASD [21, 22], выбрана по причине получения лучших результатов и возможности выбора диапазона конечным пользователем. Все эти три датчика — отдельные спектрометры. Оптоволоконный кабель имеет оптоволоконные жгуты, каждый из которых непосредственно впаян в спектрометр.

В первом датчике используется неподвижная исправленная отражающая голографическая дифракционная решетка для области 350—1050 нм и 512-элементная кремниевая фотодиодная линейка с фильтром. Этим удалось оптимизировать интервал осуществления выборки, чувствительности и температурной стабильности в этой области длин волн. Во втором и третьем датчиках используются отражающие голографические дифракционные решетки, установленные с возможностью быстрого сканирования и «градиентные» InGaAs-фотодиоды с термоохлаждателями и блокирующими фильтрами. В приборах имеется внутренняя шторка на оптике и встроенная система автоматического исправления DriftLock® для диапазона 1000—2500 нм.

Блокирующие фильтры каждого из датчиков служат для отклонения второго и других высоких порядков дифрагированного света, также

для исключения рассеянного света, попадающего на элементы датчика.

Внутренние шторки и специальное программное обеспечение для сбора темнового значения тока в текущем измерении позволяет проводить автоматическое последующее его вычитание из сигнала. Аппаратные средства совместно с программным обеспечением позволяют автоматически отслеживать темновой ток непрерывно и автоматически исправлять погашения к сигналу, для минимизации эффекта долгосрочного температурного дрейфа.

Спектрорадиометры «FieldSpec» имеют армированный оптоволоконный кабель, исключающий его повреждение в полевых условиях, все три модели имеют диапазон 350—2500 нм, уменьшенное в несколько раз соотношение сигнал/шум, одинаковое для всех моделей. Спектральное разрешение на $\lambda = 700$ нм у всех моделей составляет менее 3 нм, при $\lambda = 1400$ и 2100 нм — 10 нм. Имеется заплечный рюкзак для переноса спектрорадиометра. Все спектрорадиометры имеют в комплекте GPS-приемник.

Портативный прибор «FieldSpec-HandHeld-2» [23] тоже создан фирмой ASD. Он одинаково удобный для правой и левой руки. Компактный, прочный и легкий, весит 1.17 кг, включая батареи. Спектрорадиометр работает в диапазоне длин волн 325—1075 нм с точностью ± 1 нм и спектральным разрешением $\delta\lambda < 3$ нм при длине волны 700 нм. «FieldSpec-HandHeld-2» обеспечивает высокую производительность.

Современные полевые спектрорадиометры GER-1500 и GER-3700 разработала и выпускает фирма GER (Geophysical and Environmental Research Corporation, США). GER-1500 [17, 24] — легкий, высокопроизводительный полевой однолучевой спектрорадиометр. Прибор имеет быстрое сканирование и может быть использован как в автономном режиме, с сохранением до 500 отдельных сканирований в его памяти, так и через ноутбук, который обеспечивает обработку и отображения спектра в реальном масштабе времени. У него возможен вариант двухканального режима работы «поле — обзор неба» (DFOV). Для этого два спектрорадиометра должны быть установлены рядом друг с другом таким образом,

чтобы собирать информационные (от объекта) и эталонные (от неба) сканирования одновременно. Это позволяет оператору минимизировать влияние изменения атмосферных условий на данных. GER-1500 может записывать спектр излучения в диапазоне длин волн от 350 до 1050 нм на 512 каналах с полушириной каждого канала $\delta\lambda \leq 1.5$ нм. Поле зрения (FOV) прибора составляет $4^\circ - 8^\circ - 14^\circ$. Прибор имеет погрешности радиометрических измерений ± 5 , ± 4 и ± 5 % на длинах волн 400, 700 и 1000 нм соответственно.

Прибор GER-3700 [25, 41] — однолучевой полевой спектро радиометр, обладающий высокой производительностью измерений в широкой области длин волн (350—2500 нм) и имеющий возможность точного позиционирования с помощью луча лазера. Он изготовлен в прочном, влагоустойчивом корпусе. Отраженное излучение раскладывается на спектральные составляющие и измеряется тремя детекторами. Первый детектор является кремниевым (Si) линейным массивом с 512 элементами. Два оставшихся детектора — линейные массивы на основе сульфида свинца (PbS) с 128 и 64 элементами соответственно.

Спектро радиометр GER-3700 управляется с помощью ноутбука «Panasonic» с корпусом повышенной прочности. Спектры, отображаются на экране в режиме реального времени для немедленного интерпретации и оценки. Данные хранятся в формате ASCII для легкого переноса в другие программы.

Фирма SVC (Spectra Vista Corporation, США) разработала и выпускает современные полевые приборы [32, 44] нового поколения: SVC HR-512i SVC HR-768si и SVC HR-1024i, параметры которых приведены в таблице.

На фирме «Zeiss» (Германия) создана серия портативных полевых спектрометров «HandySpec» [30, 43]. Все они — двухканальные. Эта спектральная система специально разработана для измерения диффузного отражения растений и почвы. В качестве естественного источника света используется солнечный свет. Рабочий спектральный диапазон — от 250 до 2150 нм.

Первым прибором такого типа был портативный полевой двухлучевой спектрометр модели



Рис. 7. Портативная система «HandySpec» в рюкзаке [39]

tec5 AG фирмы «Zeiss» (Германия), разработанный специально для фермеров. Прибор выполнен на базе двух спектрометров «Zeiss-MMS-1» [43, 50] с единственной сенсорной головкой входной световодной каналами. Апертурный угол рабочего канала — 25° . Рабочий спектральный диапазон комплекса 360—1100 нм. Спектральное разрешение — 3.3 нм/пкл, (10 нм — по критерию Релея). Время экспозиции 4—6 мс. Объем памяти — 1 MB Flash (~200 измерений).

Полевые спектрометры серии tec5 также известны как спектральные приборы для разработки и производства тракторной системы Yara N — Sensor [47, 50] компанией Yara GmbH & Co.KG в Dülmen (см. ниже).

Портативная система HandySpec [30, 43] состоит из основного измерительного блока и головки датчика, которая соединена с основным блоком с помощью гибких оптических волокон. Головка датчика содержит два входных окна (на каждый из каналов) с принимающей оптикой. По первому каналу в измерительный блок передается световой поток, отраженный от земли,

Параметры полевых спектрометров и спектро радиометров

Прибор, изготовитель	Спектрометр (спектрограф)	Конфигурация сенсора	$\lambda\lambda$, мкм	Кол-во каналов	Спектральное разделение, нм (линейная дисперсия)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
Кварцевый спектрограф А. Хилгера, СССР [11]	Кварцевый спектрограф А. Хилгера	Спектрограф			12 мм между линиями С (6562.81 нм) и Н (3968.47 нм)	Фотоленка	
Полевой спектрограф НИЛ, СССР [11]	Полевой спектрограф НИЛ	Спектрограф			15 мм между линиями С и Н	Фотоленка	
Стеклопленочный спектрограф ЦНИИГАиК, СССР [11]	Стеклопленочный спектрограф ЦНИИГАиК	Спектрограф			12 мм между линиями С (6562.81 нм) и Н (3968.47 нм)	Фотоленка	
Двухпризмный ИК-спектрограф ЦНИИГАиК, СССР [11]	Стеклопленочный ИК-спектрограф	Спектрограф			16.3 мм между линиями D и р	Фотоленка	
ЛС-2, СССР [5]	Стеклопленочный призмный спектрограф	Спектрограф	0.42—0.63		н\д	Фотоленка	Радиус кривизны изображения 85.0 мм
СПА-1, СССР [7, 14]	Стеклопленочный призмный спектрограф	Спектрограф	0.62—0.8		н\д	Фотоленка	Радиус кривизны изображения 44.4 мм
«Exotech 20-B», «Exotech Inc.», США [32]	Двухлучевой спектрометр на дифракционной решетке 600 штр/мм	Спектрометр (три блока: опτικο-механический, электронный блок управления и индикации, батарея аккумуляторов)	0.4—0.9	20	15	ФЭУ-51+ФЭУ-62	Для измерений в поляризованном свете используются два поляроида (0, 60 и 120°)
Мультиполосный радиометр [40]	Спектрорадиометр	Фильмовый спектро радиометр	0.37—2.52 2.76—13.99		н\д		
«Exotech 20C-SW», «Exotech Inc.», США [20, 45]	Спектрометр на базе четырех вращающихся круговых переменных дихроичных фильтров	Спектрорадиометр	0.4—2.4		($\Delta\lambda/\lambda = 0.02-0.03$) 44 нм при 2200 нм	Si PbS PbS LiTaO3 PbS Si + PbS	Четыре круговых сегмента в виде переменных по λ линейных фильтров

PFERS, JPL, США, 1974 [19, 27, 28, 37]	Спектрометр на базе вращающегося кругового переменного дихроичного фильтра	Спектрометр	0.45—0.7 0.7—2.5		($\Delta\lambda/\lambda = 0.04$ от 0.45 до 0.7 мкм $\Delta\lambda/\lambda = 0.015$ от 0.7 до 2.5 мкм)	фоторезистор PbS фоторезистор PbS 12 бит	Охлаждаемый детектор PbS
PIDAS, JPL, США, 1984 [2, 26, 38, 45]	Три спектрометра на дифракционных решетках (второй и третий — на вращающихся четырехсекционных дифракционных решетках)	Спектрометр	0.425—0.922 0.856—1.35 1.35—1.8 1.8—2.05 2.05—2.49	512 360	0.88 нм 4.7 нм	14—16 бит Охлажд. линейка Si (VIS)-512 элем. PbS (NIR) и SWIR	Спектрометры — в баллоне под давлением Охлаждаемые детекторы PbS Процессор типа Z80
«LabSpec-4», ASD, США [18, 22, 28]	Полевой спектро-радиометр	3 составных спектрометра на дифракционных решетках	Общий: 0.35—2.5 1) 0.35— 1.05 2) 1.05—1.9 3) 1.9—2.5		3 нм (700 нм) 10 нм (1400 нм) 10 нм (2100 нм)	Фотодиодная линейка Si (512) и «градиентные» InGaAs-фотодиоды с термоохлаждителями	Все приемники имеют блокирующие фильтры. Рабочий температурный диапазон от 0 до 40 °С
«FieldSpec-HandHeld-2» [23]	Полевой спектро-радиометр	спектрометр на дифракционной решетке	0.325—1.075		<3.0 нм на 700 нм	Фотодиодная линейка (512)	
GER-1500, США [17, 24]	Полевой спектро-радиометр	спектрометр на дифракционной решетке	0.35—1.05		1.5	Фотодиодная линейка Si (512)	Поле зрения 40, 80, 140 Память — 500 сканов
GER-3700, США [25, 41]	Полевой однолучевой спектро-радиометр	3 составных спектрометра на дифракционных решетках	Общий: 0.35—2.5 1) 0.3—1.0 2) 1.0—1.89 3) 1.89—2.5	704	3.0 нм на 700 нм 11 нм на 1600 нм 16 нм на 2100 нм	16 бит Линейка Si (512) 15 бит Линейка PbS (128) 15 бит Линейка PbS (64)	Визирование — диодный лазер Поле зрения 3–6–100
SVC HR-1024i, США [32, 44]	Полевой спектро-радиометр	3 составных спектрометра на дифракционных решетках	Общий $\Delta\lambda$: 0.35—2.5 1 — (0.35—1.05) 2 — (1.05—1.9) 3 — (1.9—2.5)	1024	3.5 нм на 700 нм 9.5 нм на 1500 нм 6.5 нм на 2100 нм	16 бит Фотодиодные линейки: Si (512) InGaAs (256) Расширенный InGaAs (256)	Визирование — диодный лазер Рабочий диапазон температур: –100 +400 С Поле зрения 40, 80, 140 Память — 1000 сканов
tec5 AG, [43, 50], «Zeiss» (Германия)	Полевой двухлучевой спектрометр	2 спектрометра Zeiss MMS 1 на дифракционных решетках	0.36—1.1		10 нм (3.3 нм/пкл)	Линейка спектрометра Zeiss MMS 1	Поле зрения 250 Объем памяти — 1 МВ (~200 измерений)

Прибор, изготовитель	Спектрометр (спектрограф)	Конфигурация сенсора	$\lambda\lambda$, мкм	Кол-во каналов	Спектральное разрешение, нм (линейная дисперсия)	Тип фотоприемника, разрядность АЦП	Дополнительные данные
«HandySpec Field VIS», «Zeiss» (Германия) [30, 43]	Полевой двухлучевой спектрометр	2 спектрометра Zeiss MMS 1 на дифракционных решетках	0.36—1.1		10		
«HandySpec Field NIR», «Zeiss» (Германия) [30, 43]	Полевой двухлучевой спектрометр	2 спектрометра Zeiss MMS 1 на дифракционных решетках	0.4—2.15		10		
Спектрорадиометр для рисовых полей (Япония) [42]	Полевой спектрорадиометр	2 составных спектрометра Черни — Торнера на дифракционных решетках: 300 и 600 штр/мм	Общий $\Delta\lambda$: 0.4—1.9 1 — (0.4—0.9) 2 — (0.9—1.9)		2.8 (400—900) 5.6 (900—1900)	12 бит Фотодиодные (Si) линейки: Hamamatsu S1226-8 (VIS) B2034-01 (IR)	Опτικο-волоконный ввод длиной 10 м Поле зрения 150, CPU Z80A
Полевой спектральный АПК (Украина) [1, 3, 4, 15]	Двухканальный полевой спектрофотометр	Спектрометр Черни — Торнера с разделенной входной щелью на дифракционной решетке 150 штр/мм ($\lambda_{\text{max}} = 725 \text{ нм}$) с матричным приемником	0.52—0.8	>90	1.8—3 нм	Матрица Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS 1280×1024 пкл, 6×6 мкм ² , с внутренним АЦП	Имеется GPS-приемник и видеозерный канал
«YARA N-Sensog» «Zeiss» (Германия) [47, 50]	Двухканальный полевой спектрофотометр для растительности	2 спектрометра с волоконными входами	0.45—0.9	20 (5 задаются)	5 (10)	Фотодиодные (Si) линейки	Оптические входы: 2 или 4 отраженных от зелени сигнала — в один СФ и 1 опорный канал (излучения) — в другой СФ. Поле зрения 120°
«Shank Specs» «Veris P4000» «Veris Technologies, Inc.», США [33, 35, 48, 49]	Полевой спектрометр для почвы	2 спектрометра с волоконными входами	Общий: 0.35—2.2 или 0.45—2.2: 1) 0.35—1.0 1a) 0.45—1.0 2) 1.1—2.2	384	8	16 бит 3648 element Toshiba TCD1304AP Linear CCD Array, 256 element InGaAs Linear image sensor G9206-02 с ТЕ-охлаждением	Галогенная лампа для освещения почвы: 10.5 A 12 V (126 W) климат-контроль спектрометра, датчик температуры почвы

а по второму — освещающий. Основной блок содержит два спектрометрических модуля, управляющую электронику и сменный аккумулятор. Опорный канал снабжен косинусным диффузором. Само измерение управляется одним нажатием кнопки, расположенной на верхней части головки датчика.

Полевые спектрометры серии «HandySpec» [30, 43] доступны в трех различных основных версиях: рюкзак (рис. 7) предназначен для VIS—NIR-диапазонов; плечевая модель и с закреплением на поясе.

Корпорацией НПО «Арсенал» совместно с ГП «Завод «Арсенал», Институтом физиологии растений и генетики Национальной академии наук Украины и Институтом космических исследований Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины в 2008 г. был создан полевой двухканальный спектрофотометр для тестирования состояния растительности [1, 4, 13, 15], в том числе и посевов сельскохозяйственных культур. На базе этого прибора был создан полевой спектральный АПК для дистанционного исследования растительности [1, 3, 4], концепция построения которого была изложена еще в 2005 г. [51].

Особенности конструкции АПК для дистанционного исследования растительности испытывались в натуральных условиях на разных фазах вегетации в период весна—осень в течение нескольких лет. Эти испытания не только выявили преимущества прибора по сравнению с зарубежными аналогами, но и позволили получить ценную информацию, которая может быть положена в основу новых технологий в области валидации космических и авиационных мульти- и гиперспектральных измерений, что важно в настоящее время, особенно для проведения оцифровки земель сельскохозяйственного назначения. По сравнению с известным современным полевым спектро радиометром «FieldSpec-3(4) FR» [21, 22], созданный образец специализированного АПК имеет следующие преимущества:

- АПК не требует повторной перекалибровки при даже незначительном изменении освещенности, цветовой температуры источника освещения или угла солнцестояния;
- АПК имеет возможность дистанционного определения содержания хлорофилла в расти-

тельности в полевых условиях, особенно в условиях низких значений проективного покрытия почвы растительностью (до 25 % включительно даже на таком высоком фоне, как песок) [1, 3, 4].

МОБИЛЬНЫЕ ПОЛЕВЫЕ СПЕКТРОМЕТРЫ

Комплекс «YARA N-Sensor» («YARA FieldScan») представляет собой систему мультиспектрального сканирования (для установки на транспортном средстве) для удаленного зондирования сельскохозяйственных культур на основе двух спектрометров с высоким спектральным разрешением, блоком электроники с бортовым компьютером, с терминалом оператора и GPS. Он составляет карты спектральных индексов (*NDVI*, *SAVI*, отношения инфракрасного к красному и др.) и выдает управляющие сигналы на исполнительные системы, установленные на транспортном средстве [47, 50]. Устройство состоит из двух спектрометров S1 и S2 на диодной матрице, двух оптоволоконных кабелей (один из них разделен на две или четыре части волокна) с входными оптическими устройствами и микропроцессора в прочном корпусе, установленном на верхней части крыши транспортного средства.

Спектральное отражение спектрометром S1 измеряется на 20 длинах волн (пять выбирается пользователем) в спектральных диапазонах 450—900 нм при полуширине $\delta\lambda = 10$ нм от двух (или четырех) мест исследования, расположенных вокруг транспортного средства. Обычно за одно сканирование измеряется площадь около 50—100 м².

В измерительной системе «YARA FieldScan» выполняется коррекция полученных спектральных значений отражения из-за изменения освещенности путем регистрации спектрометром S2 опорного сигнала (от небесной полусферы), поступающего в этот спектрометр через пятый оптоволоконный кабель в том же спектральном диапазоне. Это позволяет производить расчет спектральных индексов *NDVI*, *SAVI*, отношения инфракрасного потока к красному и многих других параметров.

Система управляется с помощью пользовательского терминала, установленного внутри кабины транспортного средства. Данные сохраняются на карте памяти вместе с позиционированием (с частотой повторения 1 с).

СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЧВЫ

Использование спектрометров для измерения свойств почвы является относительно новым.

В лабораторных условиях обнаружено, что в видимой и ближней инфракрасной областях (VIS—NIR) результаты измерений спектрально-го отражения проб почвы коррелируют со вместимостью органических веществ и свойствами почвы, таких как углерод и азот, рН, влажности почвы и др.

Системы, предназначены для измерения содержания углерода и азота в почве (по спектрам в VIS—NIR-области), разработаны и внедрены в Veris Technologies, Inc., США. VIS-NIR-спектрометры фирмы Veris являются первыми коммерчески доступными системами сбора спектральных данных о почве в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра [33, 35, 48, 49].

Одна система выполняет измерения на ходу трактора, с погружаемым в грунт хвостовиком для сбора VIS—NIR-спектров на дискретных глубинах. Глубина регулируется на 2.5—10 см до 115 см. Скорость измерений — от 3 до 6 км/ч. Вторая система проводит измерения в статике с помощью зонда для сбора VIS—NIR-спектров при исследовании почвенного профиля на глубину до 1 м.

Обе системы используют два спектрометра для покрытия широкого диапазона длин волн 350—2200 нм (или 450—2200 нм) со спектральным разрешением $\delta\lambda = 8$ нм. На входе обеих систем расположено входное сапфировое окно. Почва освещается от осветителя с мощной галогенной лампой (120 Вт) через то же сапфировое окно.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛЕВОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Перспективами полевых спектрометров являются надежные, удобные в эксплуатации приборы с высокой фотометрической и спектральной точностью, с высоким спектральным разрешением ($\delta\lambda \leq 1...2$ нм), результаты измерений которых не зависят от условий измерений, естественного освещения, угла стояния Солнца, с возможностью подсоединения дополнительных датчиков [3]. На базе таких приборов возможно построение

специализированных АСК для решения определенных задач, например:

— определения содержания хлорофилла в растительности [3],

— дистанционное определения состояния растительности с последующим анализом и выдачей информации (в реальном масштабе времени) о необходимых параметрах дифференциального внесения удобрений [47, 50];

— подспутниковой валидации [1, 3] растительности с точной привязкой и выдачей географических координат и др.

Следующим поколением полевых спектральных приборов будут являться приборы так называемой новой генерации, расположенные на транспортных носителях, которые будут иметь все позитивные особенности приборов, изложенных выше, и иметь дополнительную возможность формировать информационные пакеты данных — спектральных характеристик (сигнатур), содержащих спектральную информацию не только от усредненных зон исследования, а и спектральные характеристики каждого пикселя изображения исследуемой зоны (сцены). Это так называемые полевые гиперспектральные комплексы, прототипами которых являются бортовые гиперспектральные комплексы, используемые для дистанционного зондирования земной поверхности [1 — 4, 12, 16, 51].

Отличие обычной спектральной аппаратуры и аппаратуры нового поколения (на основе гиперспектрометра) состоит в следующем.

Достоинство гиперспектрометра заключается в возможности регистрировать сигнал, отраженный от поверхности наблюдаемого объекта, который содержит спектральную информацию с одновременной пространственной привязкой участков объекта, видимых в поле зрения прибора [12]. При этом сканирование по одной из пространственных координат осуществляется за счет движения носителя гиперспектрометра (транспортного средства, на котором установлен спектральный прибор).

А регистрация в реальном времени полезного сигнала, который содержит спектральную информацию только от исследуемой растительности, без влияния отражения почвы, с одновре-

менной пространственной привязкой участков объекта, видимых в поле зрения прибора, — это основная цель создания мобильного ГС-АПК нового поколения.

Спектральные приборы такого класса обладают расширенными функциональными возможностями, например способностью выделять культурные растения на фоне почвы, а также сорняки на фоне основного поля культурных растений (работы начаты в 1970-е гг. К. Полевицким), имеют повышенную точность измерений параметров растительности при неполном проективном покрытии почвы зеленью, т. е. без учета отражения от почвы, используя при этом новые методики обработки и новые вегетативные деривативные индексы [3, 4].

Следует также отметить, что упомянутое выше новое направление полевых спектрометрических измерений, которое уже используется в США, Австралии и др. странах при анализе качества почвы [33, 35, 48, 49], необходимо расширять не только для корректировки вносимых удобрений, а и при исследовании почв, прогнозировании урожайности и составлении кадастровых карт земной поверхности с использованием космической [6], авиационной [2, 5] и наземной [3, 4] съемки.

ВЫВОДЫ

Создание полевых спектральных методов и полевых спектральных приборов, а также наземных систем подспутниковой валидации продемонстрировало, что спектрометрия вне лабораторий является ценным инструментом для количественной оценки соответствующих параметров, поддерживающих процессы для наземных экосистем.

В данной работе рассмотрены и проанализированы особенности построения полевой спектральной аппаратуры (от первых спектрографов до современных спектральных аппаратурно-программных комплексов) для спектрометрического исследования земной поверхности и ее почв. Часть из этих приборов стала своего рода испытательным полигоном при создании следующих поколений бортовой спектральной и гиперспектральной аппаратуры авиационного и космического базирования.

Полевые спектральные приборы претерпели много изменений и улучшений, на их базе созданы аппаратурно-программные комплексы для дистанционного исследования растительности, оперативного создания баз данных и управления исполнительными механизмами современной аграрной техники.

В данной работе мы рассмотрели только известные авторам конструкции полевой спектральной аппаратуры, хотя на самом деле таких полевых приборов в компаниях различных государств намного больше.

Результаты статьи будут полезны исследователям и разработчикам спектрометрических приборов, особенно спектральной аппаратуры нового поколения.

Авторы благодарны профессору Ю. Ф. Книжникову за предоставление сведений о полевом спектрографе ЛС-2 и его использовании в подспутниковых наблюдениях на высокогорном полигоне в 1979 г., Терскол, Приэльбрусье.

Работа поддержана и велась в рамках проекта УНТЦ № 5240.

1. *Донец В. В.* Обгрунтування структури апаратурно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — К., 2010. — 19 с.
2. *Донец В. В.* Особенности конструкций бортовых гиперспектрометров AIS // *Космічна наука і технологія.* — 2012. — **18**, № 5. — С. 5—11.
3. *Донец В. В., Кочубей С. М., Яценко В. А. и др.* Создание полевой спектральной аппаратурно-программного комплекса для подспутниковой валидации дистанционного исследования растительности // *Системи обробки інформації.* — 2013. — **10**, вип 8 (115). — С. 36—42.
4. *Донец В. В., Яценко В. А., Семенов О. В.* Оптимизация основных параметров гиперспектрального комплекса для исследования растительности // *Системи управління, навігації та зв'язку.* — 2011. — Вип. 4(20). — С. 44—49.
5. *Зайцев Ю. А., Мухина Л. А.* Применение цветной и спектральной аэрофотосъемки в геологических целях. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. — 304 с.
6. *Информационное агентство «Интерфакс-Запад»:* В России намерены прогнозировать урожаи при помощи космического мониторинга [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.interfax.by/news/world/143773>

7. Кирмалов Р. Л., Мартынов Г. П., Тимофеев Ю. В., Хазанова Т. М. Полевой автоматический спектрофотометр // *Агрофизика*. — 1983. — № 52. — С. 23–26.
8. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность некоторых земных образований // Исследования отражательной способности: Сб. ст. по аэрофотометрии / Под ред. Г. А. Тихона. — 1934. — № 2. — С. 29.
9. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных объектов с самолета // *Аэросъемка: Техбюл.* — 1934. — № 8-9.
10. Кринов Е. Л. Зависимость спектральных коэффициентов яркости природных объектов от направлений разований // Исследование отражательной способности: Сб. ст. по аэрофотометрии. — 1935. — № 5-6.
11. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований. — М.-Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1947. — 272 с.
12. Овчинников А. М. Разработка алгоритмических и программных средств регистрации и визуализации локальных гиперспектральных данных: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М., 2009. — 18 с.
13. Пат. України на корисну модель № UA 70505 U від 11.06.2012, М. кл. G01T 7/00. Полювий спектрометр для тестування стану рослинності / С. М. Кочубей, В. В. Донець, Т. А. Казанцев. — № u 2011 15271. — Заявл. 23.12.2011; Опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11.
14. *Посудін Ю. І.* Спектроскопічний моніторинг агросфери. — Київ: Урожай, 1998. — 128 с.
15. *Річний звіт* Національного космічного агентства України за 2008 рік. — Київ: Нац. косміч. агентство України, 2008. — С. 16–17. — Режим доступу: http://www.nkau.gov.ua/pdf/NSAU_report_2008.pdf
16. *Шовенгердт Р. А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
17. *Agariou A., Hadjimitsis D., Sarris A., et al.* Hyperspectral ground truth data for the detection of buried architectural remains // *EuroMed 2010* / Ed. by M. Ioannides. — 2010. — P. 318–331 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.euromed2010.eu/e-proceedings/content/full/318.pdf>
18. ASD_{inc} Authorized Partner LabSpec4 Specification [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.eniseylab.ru/upload/LabSpec4Specification.pdf>
19. *Ashley R. P., Abrams M. J.* Alteration mapping using multispectral images — Cuprite mining district, Esmeralda County, Nevada, 1980 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pubs.usgs.gov/of/1980/0367/report.pdf>
20. *Exotech 20C-SW Instrument Summary* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://engineering.purdue.edu/~frdata/FRData/Instruments/Exotech20CS.html>
21. *FieldSpec-3* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://meteo-tech.co.il/e-Catalog/pdf/FieldSpec.pdf>
22. *FieldSpec Portable Spectroradiometer* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers>
23. *FieldSpec HandHeld 2 Accessory Bundles* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.asdi.com/products/accessories/remote-sensing-accessories/handheld-2-accessories>
24. *GER 1500 System* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/ger1500.shtml>
25. *GER 3700 System* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/ger3700.shtml>
26. *Goetz A. F. H.* The portable instant display and analysis spectrometer (PIDAS) // *Proc. Third Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop*. — 1987. — Vol. 87-30. — P. 8–17: JPL Publ. N 88-13756 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880004374_1988004374.pdf
27. *Goetz A. F. H.* Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view // *Remote Sens. Environ.* — 2009. — **113**. — P. S5–S16 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: ftp://lasftp.colorado.edu/pub/harvey/Gamblin/IDL_code/Geotz_2009.pdf
28. *Goetz A. F. H., Billingsley F. C., Gillespie A. R., et al.* Application of ERTS image processing to regional geologic problem and geologic mapping in northern Arizona, Pasadena, California // *JPL Techn. Rept.* — 1975. — N 13-1597.
29. *Goetz A. F. H., Chabrilat S., Lu Z.* Field reflectance spectrometry for detection of Swelling Clays at construction sites // *Field Anal. Chem. and Technol.* — 2001. — **5**, N 3. — P. 143–155.
30. *HandySpec® Systems* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tec5.com/products/84/en/handyspec%C2%AE-systems.html>
31. *Hatchell D. C.* Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD) Technical Guide 3rd Ed. USA 1999 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ger.uchile.cl/Biblioteca/radiometr%C3%ADa%20de%20campo/Tech-Guide.pdf>
32. *Leamer R. W., Myers V. I., Silva L. F.* A spectroradiometer for field use // *Rev. Sci. Instrum.* — 1973. — **44**. — P. 611–614 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/rsi/44/5/10.1063/1.1686195>
33. *Lund E. D., Kweon G., Maxton C. R., Drummond P. E.* VIS-NIR — Spectrophotometer addressing tomorrow's soil challenges today soil carbon and nitrogen mapping: how these relate to new markets and public policy [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.veristech.com/images/9th_ICPA.pdf
34. *MacDonald J., Ustin S. L., Schaepman M.* A review of the contributions of Dr. Alexander F. H. Goetz to imaging spectrometry [Электронный ресурс]. — Режим досту-

- па: http://webdocs.dow.wur.nl/internet/grs/Workshops/Environmental_Applications_Imaging_Spectroscopy/1_MacDonald_GoetzAchievements/MacDonald_Goetz_Achievements.pdf
35. *Marcos N. F.* Investigaç o preliminar sobre o Uso do Veris P4000 Soil Force/Eca/Spectral Profiler para predic o de densidade de carbono em solos australianos Dezembro, 2009 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/estagio/Marcos.pdf>
 36. *Milton E. J., Schaepman M. E., Anderson K., et al.* Progress in field spectroscopy // Remote Sens. Environ. — 2009. — **113**. — P. S92—S109 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.geo-informatie.nl/courses/grs60312/fieldwork/miltonetal2009.pdf>
 37. *Milton T., Schaepman M., Anderson K., et al.* Progress in field spectroscopy. Appendix E Goetz A. F. H. Portable Field Reflectance Spectrometer // JPL Techn. Rept. — 1975. — N 32-1597. — P. 183 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.wageningenur.nl/upload_mm/0/5/1/9990b361-9539-4200-ad67-57ee07b1b0cb_Milton_FieldSpectroscopy.pdf
 38. *Portable instant display and analysis reflectance spectrometer*: Patent US 4560275 A [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.google.co.in/patents/US4560275>
 39. *Precision farming — mobile spectrometers in agriculture* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://spectronet.de/portals/visqua/story_docs/intern_spectronet/vortraege/120417_13_collab_vortraege/120417_09_kirchler_tec5.pdf
 40. *Robinson B. F., Bauer M. E., DeWitt D. P., et al.* A multi-band radiometer and data acquisition system for remote sensing field research [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.isprs.org/proceedings/XXIII/congress/part7-8/783_XXIII-B7-8.pdf
 41. *Schaepman M. E.* Calibration of field spectroradiometer Zurich 1998 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rs11/Spe1998/RSS_98_31.pdf
 42. *Shibayama Michio, Craig L. Wiegand, Tsuyoshi Akiyama, Yoshiki Yamagata.* Radiometric predictions for agronomic variables of rice canopies using a visible to mid-infrared spectroradiometer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.isprs.org/proceedings/XXVII/congress/part7/508_XXVII-part7.pdf
 43. *Spectrometer Systems: HandySpec® Series* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tec5usa.com/header/specSystems/handySpec/>
 44. *SVC HR-1024 field spectroradiometer* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://fsf.nerc.ac.uk/instruments/svc_hr-1024.shtml
 45. *The Future of Field Spectroscopy: Product development (Part 2 of 4)* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://discover.asdi.com/bid/84163/The-Future-of-Field-Spectroscopy-Product-Development-Part-2-of-4>
 46. *Vanderbilt V. C., Robinson B. F., Biehl L. L., et al.* Simulated response of a multispectral scanner over wheat as a function of wavelength and view/Illumination directions [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.isprs.org/proceedings/XXIII/congress/part7-8/942_XXIII-B7-8.pdf
 47. *Varco J. J.* Sensor based fertilizer nitrogen management [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cottoninc.com/fiber/Agricultural-Research/Agricultural-Meetings-Conferences/Crop-Management-Seminars/2010%20Presentations/23-PA-Sensor-Based-Fertilizer-Nitrogen-Management.pdf>
 48. *VIS—NIR shank specifications and standard features* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.veristech.com/products/shankspecs.aspx>
 49. *VIS—NIR spectrophotometer* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.veristech.com/images/VIS-NIR_shank.pdf
 50. *YARA FieldScan — Multi-spectral system for remote sensing* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.tec5usa.com/header/specSystems/Yara/>
 51. *Yatsenko V., Kochubey S., Donets V., Kazantsev T.* Hardware-software complex for chlorophyll estimation in phytocenoses under field conditions // Proc. SPIE. — 2005. — **5964**. — P. 6. — (Optical Systems Design: SPIE Europe Inter. Symp., 12—16 September 2005, Friedrich-Schiller-Universit t Jena).

Стаття надійшла до редакції 17.03.14

В. В. Донець, О. О. Броварець, В. В. Бровченко

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЛЬОВОЇ СПЕКТРАЛЬНОЇ АПАРАТУРИ

Подається аналіз особливостей польової спектральної апаратури, створеної починаючи з 1930-х рр. для дослідження земної поверхні та наземних об'єктів, а також для підсупутникової валідації спектрометричних даних. Досягнення передових технологій, які були розроблені та апробовані у польових спектрометрах, були і будуть надалі втілені в ряд бортових спектрометрів різного призначення.

V. V. Donets, A. A. Brovarets, V. V. Brovchenko

AN ANALYSIS OF FIELD SPECTRAL APPARATUS FEATURES

We present an analysis of the features of field spectrometers for remote sensing of the Earth's surface and ground objects as well as for satellite validation of spectrometric data which were developed from the 1930s to the present time. Advanced technology achievements developed and tested in field spectrometers were and will be implemented in a number of airborne spectrometers for various purposes.