

Возможность распознавания почвенного покрова опытного поля с использованием наземных и спутниковых данных

А. П. Шевырнов¹, И. Ю. Ботвич¹, Д. В. Емельянов¹, А. А. Ларько¹,
Г. С. Высоцкая¹, В. К. Ивченко², Т. Н. Демьяненко²

¹ *Институт биофизики СО РАН, Красноярск, 660036, Россия*
E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

² *Красноярский государственный аграрный университет*
Красноярск, 660049, Россия
E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

В статье представлены результаты исследования, показывающего возможность распознавания почвенного покрова, имеющего различный тип почв и вид обработки, методами дистанционного зондирования. Исследование основывается на спутниковых (Sentinel-2) и наземных (Spectral Evolution PSR-1100F) оптических данных различного пространственного и спектрального разрешения. На изучаемом объекте учебно-опытное хозяйство «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края с высокой неоднородностью экспериментальных участков установлено, что измерения коэффициента спектральной яркости с высоким спектральным разрешением могут использоваться для оценки приёмов обработки и в ряде случаев — для выявления типов почв. Установлено, что наличие стерни на поверхности почвы оказывает существенное влияние на процесс идентификации типов почв. Наибольшее различие в видовом разнообразии почв может быть установлено при отсутствии стерни. Выявлена возможность дистанционного выделения почвы типа АЧгигм^{***} при способе обработки «вспашка» среди других типов почв. Анализ спутниковых данных Sentinel-2 и их пространственной изменчивости показал, что прямые характеристики, рассчитанные по каналам № 2, 3, 4, 8, могут быть использованы для оценки приёмов обработки почв и агрофизических параметров на начальном этапе вегетационного периода (открытая поверхность).

Ключевые слова: спутниковые и наземные методы исследований, земли сельскохозяйственного назначения, Sentinel-2, почвы

Одобрена к печати: 29.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-150-160

Введение

Проблема ресурсосбережения является определяющей для эффективного функционирования сельскохозяйственного производства (Окунев, Рахимов, 2013). В целях повышения конкурентоспособности предприятий применяются различные энергосберегающие технологии возделывания сельскохозяйственных культур (Окунев и др., 2017). Наиболее приоритетным направлением является замена традиционных технологий на почвозащитные (Ивченко, Михайлова, 2017). В связи с этим в последние годы всё большее распространение получают ресурсосберегающие технологии обработки почвы (нулевая, плоскорезная, поверхностная), направленные на уменьшение энергетических и трудовых затрат. Установлено, что замена вспашки плоскорезной обработкой с оставлением на поверхности растительных остатков и стерни существенно сдерживает процесс минерализации почвенного органического вещества. Также показано, что замена вспашки плоскорезной и поверхностной обработкой способствует обогащению верхнего слоя почвы растительными остатками, что повышает её водоудерживающую способность и препятствует испарению влаги (Лощина, 2016). В мировом земледелии в последние годы начала распространяться система No till, т.е. посев без предварительной обработки почвы, или «прямой посев» (Холзаков, 2007). Применение технологий нулевой системы обработки почвы No till позволяет решить комплекс вопросов сохранения её плодородия (Окунев и др., 2017).

Применение почвенных карт с указанием вида обработки почвы является одним из необходимых средств рационального использования земельных ресурсов. Дистанционные данные позволяют объективно и в крупных масштабах оценить почвенную неоднородность пахотных земель.

Эффективным способом получения адекватной информации является совместная обработка спутниковых и наземных оптических измерений. Спутниковые измерения позволяют охватить большие территории с достаточной повторностью. Однако оставляет желать лучшего их пространственное и спектральное разрешение, а также зависимость от атмосферных условий. Наземные спектральные измерения могут эффективно применяться для изучения тонких спектральных особенностей отражения почв и растительности. Также они представляют интерес для выявления незначительных изменений состояния растительности в течение вегетационного периода на ограниченных по площади участках.

Цель данного исследования — изучение возможности распознавания почвенного покрова, имеющего различный тип почв и вид обработки. Основой является использование спутниковых и наземных оптических данных различного пространственного и спектрального разрешения.

Объект и методы исследования

Исследования проводились на землях ООО «Учебно-опытное хозяйство «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края в течение вегетационного периода 2018 г. На *рис. 1* представлено месторасположение опытного поля и его структура. Опытное поле состоит из пяти полос. Их средняя протяжённость — 650 м. Полосы расположены с запада на восток, ширина каждой полосы — 20 м. Посев различных культур произведён с 19 по 29 мая. Каждая полоса засеяна определённым видом сельскохозяйственных культур (1-я, 3-я — пшеница «Новосибирская 15», 2-я — кукуруза «Машук», 5-я — ячмень «Ача»). Четвёртую полосу занимает сидеральный пар. Все полосы разделены на четыре тестовых участка в соответствии с видами обработки почв:

- a* — вспашка (ПН-5-35 на 20–22 см);
- b* — плоскорезная обработка (КПШК-3,8 на 20–22 см);
- c* — поверхностная обработка (дискатор БДШ-5,6 на 8–10 см);
- d* — прямой посев при нулевой обработке почвы (Агратор 4,8).



Рис. 1. Месторасположение опытного поля учебного хозяйства «Миндерлинское», структура по видам обработки и типам посевов. Линии белого цвета указывают на границы разных типов обработки почвы

Для чистоты эксперимента все тестовые участки отделены друг от друга защитными полосами шириной 5 м. Полевое спектрометрирование выполнено 2 июня 2018 г. На этот момент времени почвенный покров был свободен от растительности, единичные всходы отмечены на полосе № 5 (ячмень). В зависимости от вида обработки и возделываемых в прошлом

году культур на участках присутствовала стерня в разных объёмах и разной структуры. На полосе № 3 имелись прошлогодние остатки кукурузы, размеры которых доходили до 45–50 см. Наименьшее количество прошлогодней стерни наблюдалось на полосе № 1 в связи с тем, что в 2017 г. данные участки были отведены под пар. Наземное полевое спектрометрирование проведено на 131 тестовом участке. Расстояние между измерениями составило около 50 м.

При проведении полевой спектрометрии использовался спектрорадиометр Spectral Evolution PSR-1100F. Получаемые данные — коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) объекта в диапазоне от 320 до 1100 нм. Для получения КСЯ ($\rho(\lambda)$) растительного сообщества производилась последовательная съёмка яркости ортотропной поверхности отражательно-эталона ($B_0(\lambda)$) и яркости исследуемого объекта ($B(\lambda)$). Измерения проводились в ясную погоду с 11:00 до 15:00 местного времени, что на широте проводимых работ обеспечивало малоизменяющиеся, допустимые условия освещения объектов. Положение спектрорадиометра относительно измеряемой площадки всегда устанавливалось в нади́р. В ходе спектрометрирования производилась спектральная и контрольная фотосъёмка площадок диаметром около 50 см.

Расположение типа почвы на каждом исследуемом тестовом участке определялось по его местоположению на почвенной карте, предоставленной сотрудниками Красноярского государственного аграрного университета. Почвы названы в соответствии с современной классификацией (Шишов, Тонконогов, 2004). Почвенный покров исследуемого поля неоднороден и представлен шестью почвенными контурами (рис. 2):

1. АЧгигм''' — агрочернозём глинисто-иллювиальный гидрометоморфизованный мощный (однородный контур).
2. АЧги' + (АЧкм') — агрочернозёмы глинисто-иллювиальные и криогенно-мицеллярные маломощные.
3. АЧги' + (АЧкм') + <АЧгио'''> — агрочернозёмы глинисто-иллювиальные маломощные в комплексе (25–50 %) с агрочернозёмами криогенно-мицеллярными маломощными и агрочернозёмами глинисто-иллювиальными оподзоленными среднемощными (до 10 %).
4. АЧги' + (АЧги''') + <АЧкм'> — агрочернозёмы глинисто-иллювиальные маломощные в комплексе (25–50 %) с агрочернозёмами глинисто-иллювиальными мощными и агрочернозёмами криогенно-мицеллярными маломощными (до 10 %).
5. АЧги' + [АЧкм'] — агрочернозёмы глинисто-иллювиальные маломощные в комплексе (10–25 %) с агрочернозёмами криогенно-мицеллярными маломощными;
6. АЧги'' — агрочернозём глинисто-иллювиальный среднемощный.

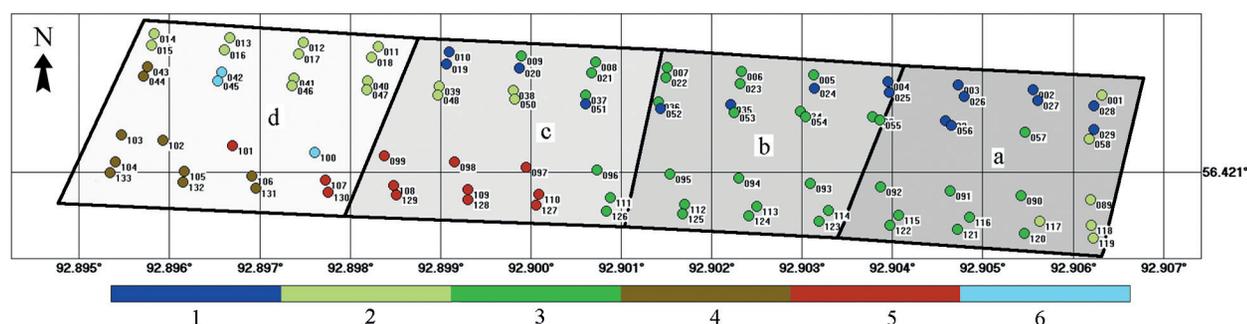


Рис. 2. Расположение тестовых участков на опытном поле учебного хозяйства «Миндерлинское». Круги — места проведения измерений. Цветами обозначены различные классы в соответствии с типом почвы. Вид обработки указан буквами а–d, границы обработок — линиями

На рис. 2 представлена комплексная схема с точками полевых спектральных измерений, информацией о типах почв и видах обработок на измеряемых участках.

Для дешифрирования почвенной неоднородности использовалась спутниковая информация Sentinel-2 с уровнем предварительной обработки Level-1C (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). На этапе предварительной обработки производилась атмосферная коррекция данных до уровня Level-2A путём использования процессора Sen2Cor из набора инструментов Sentinel-2 Toolbox для программного обеспечения Sentinel Application Platform (SNAP) (<http://step.esa.int/main>). Далее по полученным данным проводился расчёт спектральных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Jordan, 1969), NDSI (Normalized Difference Soil Index) (Wolf, 2012), NRVI (Normalized Ratio Vegetation Index) (Baret, Guyo, 1991) (табл. 1). В ходе тематической обработки использовались каналы № 2, 3, 4, 8 Sentinel-2.

Таблица 1. Расчёт спектральных индексов по спутниковым и наземным данным

Индекс	Формула расчёта	
	по данным Sentinel	по данным Spectral Evolution PSR-1100F
NDVI	$(b8 - b4) / (b8 + b4)$	$(КСЯ_{785-900} - КСЯ_{650-680}) / (КСЯ_{785-900} + КСЯ_{650-680})$
NDSI	$(b2 - b3) / (b2 + b3)$	$(КСЯ_{456-523} - КСЯ_{542-577}) / (КСЯ_{456-523} + КСЯ_{542-577})$
NRVI	$((b4/b8) - 1) / ((b4/b8) + 1)$	$((КСЯ_{650-680} / КСЯ_{785-900}) - 1) / ((КСЯ_{650-680} / КСЯ_{785-900}) + 1)$

Для обработки и анализа измеренных наземных и спутниковых данных все участки в соответствии с типом почв и видом обработки были разделены на 14 классов (табл. 2).

Таблица 2. Количество спектров/пикселей в классах

Вид обработки	Тип почв					
	1	2	3	4	5	6
<i>a</i>	9/23	8/25	15/101	—	—	—
<i>b</i>	6/9	—	26/147	—	—	—
<i>c</i>	5/16	6/23	7/7	—	9/60	4/20
<i>d</i>	—	13/48	—	14/57	3/20	5/13

Примечание: цифрами 1–6 обозначены типы почв; буквами *a–d* — вид обработки почв. Символ «—» указывает на отсутствие данных для класса. В числителе — количество наземных спектров; в знаменателе — количество пикселей в классе по данным Sentinel-2.

Результаты и обсуждение

Отражательная способность поверхности почвы определяется несколькими факторами: её типом, видом обработки, наличием стерни и влажностью. Поскольку тестовые участки расположены в непосредственной близости друг к другу, то они имеют одинаковую влажность.

Особенностью почвенного покрова исследуемого поля является его неоднородность. Она включает шесть почвенных комбинаций, представленных шестью почвами, различающимися на типовом, подтиповом и видовом уровнях. В связи с наличием одного подтипа почв в разных контурах существует возможность нахождения тестовых участков с одинаковым спектром в разных местах. Контур с типом АЧгигм''' (1) является однородным и должен быть выделен в отдельную группу. Контур АЧги' + (АЧкм') + <АЧгио''> (3) включает АЧгио, который также отсутствует во всех других контурах. В пяти рассмотренных вариантах присутствует АЧги и в четырёх — АЧкм. Таким образом, в отдельный класс должны выделиться спектры с 1-м типом почв. Контур № 2, 3, 4 и 5 могут быть схожи между собой и пересекаться. Контур № 3 должен иметь спектры, отличные от всех других.

Вид обработки почвы оказывает непосредственное влияние на формирование спектра, так как определяет агрофизические свойства почвы (плотность, твёрдость, структуру, глыбистость).

Вспашка (обработка отвальным плугом) приводит к оборачиванию и одновременному крошению пахотного слоя почвы. Верхний горизонт пахотного слоя (0–10 см) вместе со стерней перемещается на дно борозды, а на поверхность выворачивается нижний горизонт, который при подъёме на отвал плуга крошится. В результате этого поверхность почвы получается более однородной, количество стерни — самое низкое по сравнению с другими видами обработки, сорная растительность на момент исследования присутствует на тестовых участках единично.

Плоскорезная и поверхностная обработки — это рыхление почвы (без оборачивания) с сохранением стерни на поверхности. Особенностью этих видов обработки является слабое крошение обрабатываемого слоя. При сравнении плоскорезной и поверхностной обработок последняя будет иметь наибольшую плотность. В целом поверхностная обработка уступает по эффективности другим системам обработки почвы (плоскорезной и вспашке) (Борин, Лощина, 2015).

При использовании технологии No-Till оставшаяся на поле стерня не сжигается и не заделывается в почву, а все органические остатки измельчаются до определённого размера и в виде мульчи равномерно распределяются по полю, поэтому главным требованием при обработке почвы данным способом является её ровная поверхность.

Следующий фактор, влияющий на спектр отражения почвы — наличие стерни. Сохранение стерни обеспечивает защиту почвы от выдувания, летом способствует уменьшению испарения почвенной влаги, зимой — снегозадержанию.

Анализ спектральных особенностей выбранных классов осуществляется путём усреднения значений внутри классов, расчёта минимальных и максимальных значений, стандартного отклонения от среднего (рис. 3).

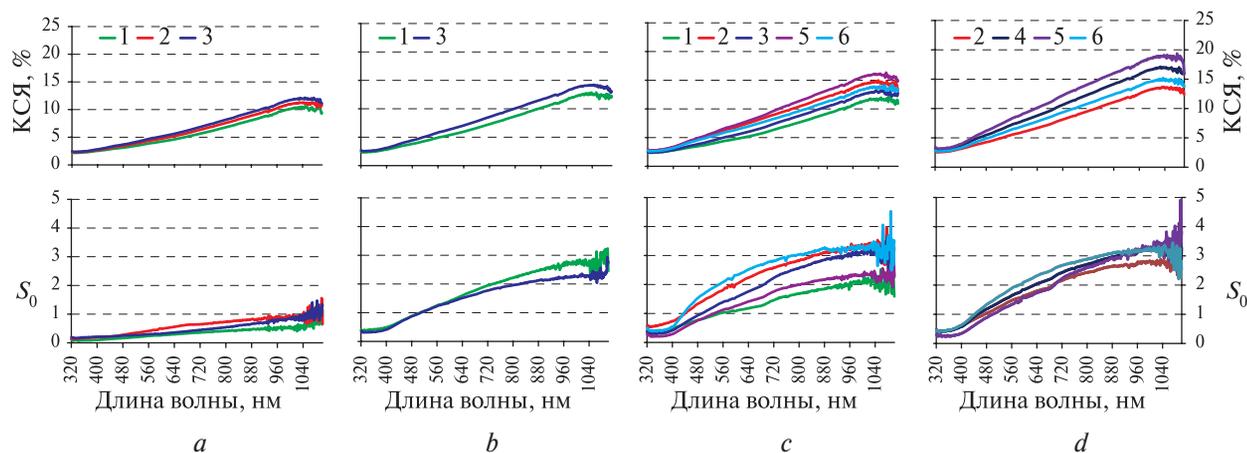


Рис. 3. Зависимости коэффициента спектральной яркости (КСЯ) и стандартного отклонения (S_0) от длины волны для разных видов обработки (a — вспашка; b — плоскорезная; c — поверхностная; d — прямой посев при нулевой обработке почвы)

Наименьшие значения стандартного отклонения классов характерны для обработки a. Это объясняется наличием более однородных по структуре участков и наименьшим количеством стерни. Наибольшие отклонения свойственны для обработок c и d. При поверхностной обработке разным видам почв соответствует разное стандартное отклонение (1, 5 — самое низкое, 6 — самое высокое) (см. рис. 3). Отличия между классами по S_0 — минимальные для обработки a и максимальные для обработки c.

Установлены значительные различия величины S_0 для классов 1, 2, 3 и сходство формы кривых для класса 6 при разных видах обработки. Первый класс имеет самые низкие значения

КСЯ при обработках почвы *a, b, c*. У пятого класса с обработками *c, d* — самые высокие значения КСЯ.

Наиболее важной для дальнейшего применения дистанционных методов является информация о КСЯ в случае обработки почвы по способам *c, d*. В ближнем ИК-диапазоне разница между максимальными и минимальными значениями составляет 25–30 %.

Наличие стерни на поверхности почвы вносит существенный вклад в формирование спектра отражения, увеличивая его по всем длинам волн в зависимости от площади её проективного покрытия (ПП) (рис. 4).

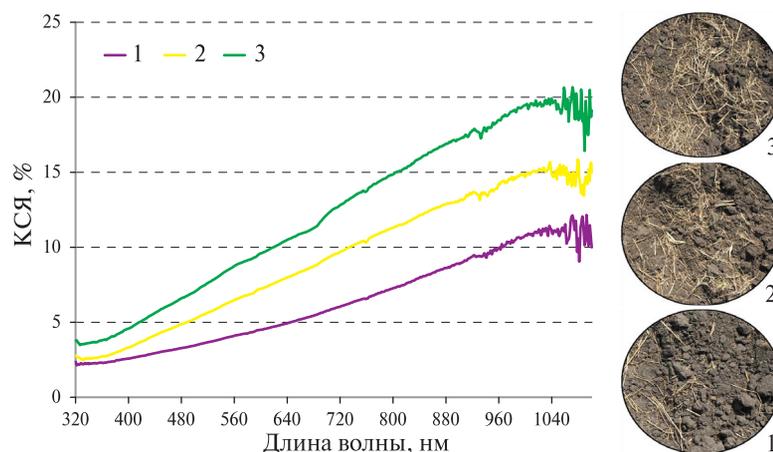


Рис. 4. Зависимость коэффициента спектральной яркости (КСЯ) от длины волны тестовых участков № 1 (ПП 12 %), 2 (ПП 30 %), 3 (ПП 50 %). Тип почв — № 2, вид обработки — *d*, полоса № 1

В связи с этим идентификация типов почв становится затруднительной и для её выполнения необходим подбор отдельных участков без стерни. Таким образом, можно сделать вывод, что идентификация типов почв в диапазоне длин волн 320–1100 нм должна выполняться на участках, свободных от стерни.

На рис. 5 (см. с. 155) и 6 представлены пространственные распределения значений спектральных индексов NDVI, NDSI, NRVI и значений отражения (reflectance) каналов № 2, 3, 4, 8. Шкала градаций цвета соответствует изменениям значений индексов и каналов на исследуемом поле — от минимального до максимального.

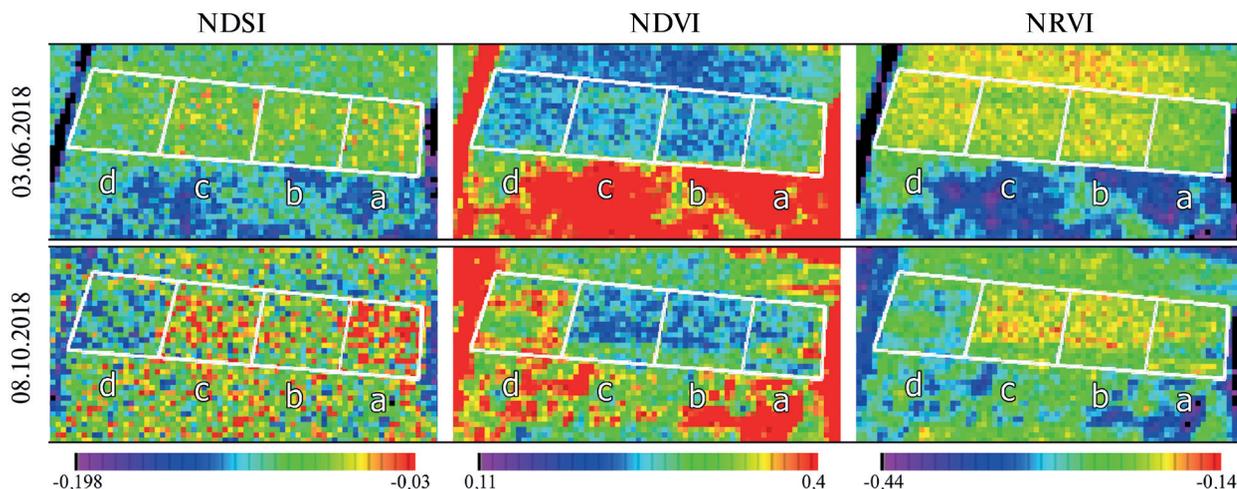


Рис. 5. Пространственное распределение значений NDSI, NDVI, NRVI на исследуемом опытном поле; снимки получены спутником Sentinel-2 03.06.2018 (вверху) и 08.10.2018 (внизу). Белыми линиями обозначены границы поля и видов обработки (*a, b, c, d*)

Применение почвенного индекса NDSI по спутниковым данным на опытном поле позволяет увидеть следующие особенности при сравнении участков с разными видами обработки. Обработка типа *d* (прямой посев при нулевой обработке почвы) отличается от всех остальных. Применение других индексов NDVI, NRVI не даёт различий между измеряемыми участками. Это может быть обусловлено тем, что в случае обработки типа *d* сохраняется структура верхнего слоя, в то время как при типах *a*, *b*, *c* наблюдается изменение структуры верхнего горизонта почвы, что приводит к весьма малым изменениям спектрального состава отражённой радиации и она малодоступна для индексной обработки спутниковой информации. Наземные измерения с высоким спектральным разрешением и практически без атмосферных помех и помех, вызванных условиями освещения, позволяют выявить тонкие спектральные различия. В значительной степени неразличимость величин индексов на разных участках определяется подобным изменением отражательной спектральной характеристики после перемешивания почвы.

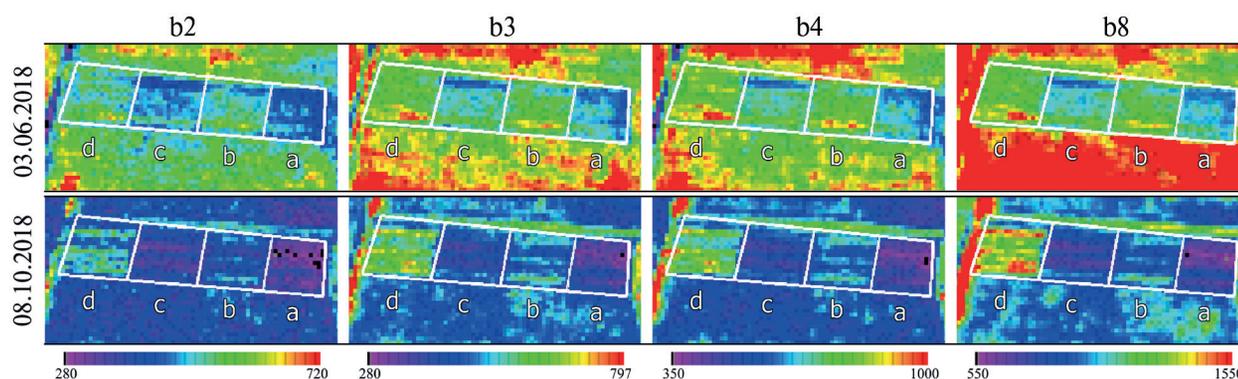


Рис. 6. Пространственное распределение значений отражательной способности каналов (b2, b3, b4, b8) на исследуемом опытном поле; снимки получены спутником Sentinel-2 03.06.2018 (вверху) и 08.10.2018 (внизу). Белыми линиями обозначены границы поля и видов обработки (*a–d*)

Прямые измерения отражённой радиации в различных спектральных каналах дают другую информацию. На приведённых рисунках видно, что каналы № 2, 3, 4, 8 позволяют увидеть пространственную неоднородность принимаемого сигнала, благодаря которой можно распознавать участки с различным видом обработки почвы. Среди видов обработки особо выделяется тип *a* — вспашка. Обработка типа *c* также даёт относительно равномерную поверхность поля отражённой яркости, за исключением полосы в южной части участка, причиной чему может являться стерня и, возможно, единичные всходы пшеницы. На рис. 6 (по данным от 03.06.2018) на участке с обработкой *c* на всех каналах выделяется горизонтальная полоса в верхней части зоны. По данным от 08.10.2018 отдельные полосы на всех участках просматриваются в большем количестве. Наличие полос обусловлено использованием почвы в предыдущем временном периоде.

Достоверность определения различий исследуемых групп, разделённых по видам обработки (*a–b*, *a–c*, *a–d*, *b–c*, *b–d*, *c–d*, где *a* — вспашка, *b* — плоскорезная обработка, *c* — поверхностная обработка, *d* — прямой посев при нулевой обработке почвы), подтверждена расчетом коэффициентов достоверности различия на основании *t*-критерия Стьюдента. Статистическая оценка степени взаимных различий групп и их сравнение с критической величиной ($t_{\text{крит}} = 1,96$) показали, что исследуемые группы отличаются друг от друга более значительно при использовании значений отражательной способности каналов (b2, b3, b4, b8) по сравнению с индексными величинами (NDVI, NDSI, NRVI). Для отдельных вариантов, рассчитанных по индексным характеристикам, полученные различия являются статистически незначимыми (в табл. 3 и 4 данные графы выделены серым цветом):

- по данным от 3 июня 2018 г.: *b–c* (NDSI), *b–d* (NDVI), *b–d* (NRVI);
- по данным от 8 октября 2018 г.: *b–c* (NDVI), *b–c* (NRVI).

Таблица 3. Значения *t*-критерия Стьюдента групп, разделённых по видам обработки, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, *df* — число степеней свободы. По данным от 3 июня 2018 г.

Показатели	Значения <i>t</i> -критериев Стьюдента					
	<i>a-b</i>	<i>a-c</i>	<i>a-d</i>	<i>b-c</i>	<i>b-d</i>	<i>c-d</i>
NDVI	15,40	12,70	16,07	4,58	0,35	4,97
NDSI	4,30	2,64	8,96	1,50	4,81	6,12
NRVI	15,40	12,70	16,07	4,58	0,35	4,97
b2	20,66	7,55	24,94	12,79	3,79	17,00
b3	21,26	8,16	26,84	12,43	5,47	18,11
b4	23,64	10,84	29,67	12,91	6,03	19,22
b8	20,23	6,23	24,69	12,48	6,32	18,00
<i>df</i>	359	382	380	383	381	404

Таблица 4. Значения *t*-критерия Стьюдента групп, разделённых по видам обработки, при уровне значимости $\alpha = 0,05$, *df* — число степеней свободы. По данным от 8 октября 2018 г.

Показатели	Значения <i>t</i> -критериев Стьюдента					
	<i>a-b</i>	<i>a-c</i>	<i>a-d</i>	<i>b-c</i>	<i>b-d</i>	<i>c-d</i>
NDVI	8,24	7,87	11,98	0,27	24,35	23,38
NDSI	6,75	3,94	16,72	2,83	11,29	13,44
NRVI	8,24	7,87	11,98	0,27	24,35	23,38
b2	23,89	13,92	35,80	12,71	14,14	26,98
b3	26,02	14,64	39,68	13,40	18,56	30,81
b4	31,87	17,20	40,44	15,53	17,25	29,79
b8	23,51	10,81	41,97	13,05	25,18	35,95
<i>df</i>	359	382	380	383	381	404

Таким образом, установлено, что использование значений отражательной способности каналов (b2, b3, b4, b8) является статистически значимым и более информативным по сравнению с индексными величинами (NDVI, NDSI, NRVI) при разделении поверхности почвы по видам обработки.

Из всего анализа, полученного по спутниковым материалам, можно сделать вывод, что на данном этапе наибольшее различие пространственного распределения отражательной способности почвенного покрова дают каналы № 2, 3, 4, 8 спутника Sentinel внутри зон *a*, *b*, *c*, *d* по сравнению с индексными данными. Установлено, что участки земель сельскохозяйственного назначения на начальном этапе эксплуатации в течение года, т. е. во время отсутствия растительности, могут быть дифференцированы с использованием космических аппаратов с относительно высоким пространственным разрешением в многоканальном режиме (на примере аппаратуры Sentinel с пространственным разрешением 10 м и с использованием каналов № 2, 3, 4, 8). Наибольшая дифференциация достигается в осенний период после проведения обработки почвы (до сева культур).

Сопоставление наземной информации со спутниковой показало, что последняя может эффективно использоваться на сельскохозяйственных территориях с достаточными линейными размерами. Совместное использование наземных и спутниковых данных позволяет более точно воспользоваться спутниковой информацией. Спутниковые измерения характеризуются широкими спектральными диапазонами измерительной аппаратуры и более низким пространственным разрешением. Размеры исследуемых участков опытного поля могут оказаться недостаточно велики для эффективного использования. Если говорить о наземных спектральных измерениях, то здесь ситуация обратная.

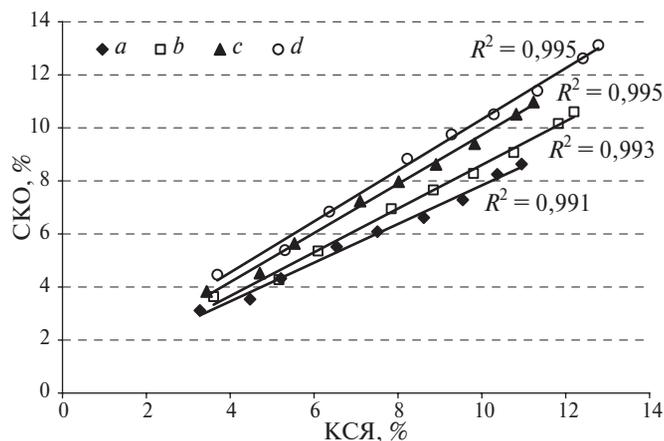


Рис. 7. Зависимость величин спутниковых (Sentinel-2) и наземных (Spectral Evolution PSR-1100F) измерений

зонах наземной аппаратуры выбраны интервалы длин волн, соответствующие спектральным каналам Sentinel-2.

При оценке связи КСЯ и величины спектрального отражения (СКО) по данным Sentinel-2 установлена высокая степень корреляции для разных видов обработки (a, b, c и d): 0,996; 0,997; 0,998; 0,998 соответственно — при уровне значимости $p < 0,05$ (рис. 7).

Таким образом, в работе показана тесная связь между наземными и спутниковыми спектральными измерениями на исследуемых объектах.

Заключение

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы:

- на изучаемом объекте «Учебно-опытное хозяйство «Миндерлинское» Сухобузимского района Красноярского края с большой неоднородностью почвенного покрова экспериментальных участков установлено, что измерения КСЯ с высоким спектральным разрешением могут использоваться для оценки видов обработки и в ряде случаев — для выявления типов почв;
- в условиях проведения полевых работ на избранном полигоне спектральные контрасты по типам почв оказались невысокими. Это накладывает дополнительное требование на проведение оптических измерений для адекватной оценки пространственного распределения типов почв;
- наличие стерни на поверхности почвы оказывает существенное влияние на процесс идентификации типов почв. Наибольшие различия в видовом разнообразии почв могут быть установлены при её отсутствии;
- установлена возможность дистанционного выделения почвы типа АЧгигм”” среди других типов почв при способе обработки «вспашка»;
- анализ спутниковых данных Sentinel-2 и их пространственной изменчивости показал, что прямые характеристики, рассчитанные по каналам № 2, 3, 4, 8, могут быть использованы для оценки типов обработки почв и агрофизических параметров на начальном этапе вегетационного периода (открытая поверхность);
- установлено, что использование значений отражательной способности каналов (b2, b3, b4, b8) является статистически значимым (при уровне значимости $\alpha = 0,05$) и более информативным по сравнению с индексными величинами (NDVI, NDSI, NRVI) при разделении поверхности почвы по видам обработки;
- в работе показана тесная связь между наземными и спутниковыми спектральными измерениями на исследуемых объектах. При оценке связи КСЯ и величины спектраль-

Они характеризуются высокой точностью, высоким спектральным разрешением, точной привязкой к местности, но не могут использоваться на больших участках из-за трудоёмкости проведения полевых измерений. При наличии больших сельскохозяйственных территорий более рациональны спутниковые методы. В случае совершенствования технологий и проверки адекватности проводимых измерений необходимо использовать наземную спектральную аппаратуру.

Расчёт коэффициентов корреляции Пирсона показал тесную связь полученных наземных и спутниковых измерений. В качестве спектральных диапазонов наземной аппаратуры

ного отражения по данным Sentinel-2 установлена высокая степень корреляции для разных видов обработки (a , b , c и d): 0,996; 0,997; 0,998; 0,998 соответственно — при уровне значимости $p < 0,05$.

Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках реализации проекта «Разработка и апробация методов контроля земель сельскохозяйственного назначения для создания системы точного земледелия».

Литература

1. Борин А. А., Лощина А. Э. Зависимость урожайности зерновых культур от приемов агротехники // Владимирский земледелец. 2015. № 2(72). 2015. С. 2–6.
2. Ивченко В. К., Михайлова З. И. Влияние различных обработок почвы и средств интенсификации на продуктивность зерновых культур // Вестн. Красноярского гос. аграрного ун-та. 2017. № 4. С. 3–10.
3. Лощина А. Э. Урожайность культур севооборота при различных системах обработки почвы // Аграрный вестн. Верхневолжья. 2016. № 1. С. 22–27.
4. Окунев Г. А., Рахимов Р. С. Зональные проблемы ресурсосберегающих технологий в земледелии (на примере зернового комплекса ОАО «Птицефабрика Челябинская») // Фундаментальные основы научно-технической и технологической модернизации АПК: материалы Всерос. научно-практической конф. Уфа: Башкирский гос. аграрный ун-т, 2013. С. 253–263.
5. Окунев Г. А., Кузнецов Н. А., Канатпаев С. С. Ресурсосберегающие технологии — резерв повышения эффективности земледелия // АПК России. 2017. Т. 24. № 1. С. 136–141.
6. Холзаков В. М. Ресурсосберегающие технологии в земледелии // Вестн. Ижевской гос. с.-х. акад. 2007. № 3(13). С. 2–3.
7. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
8. Baret F., Guyo G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // Remote Sensing of Environment. 1991. V. 35. P. 161–173.
9. Jordan C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor // Ecology. 1969. V. 50. P. 663–666.
10. Wolf A. Using WorldView-2 Vis-NIR multispectral imagery to support land mapping and feature extraction using normalized difference index ratios // Proc. SPIE. V. 8390. 2012.

Possibilities of experimental field soil cover recognition using ground and satellite data

A. P. Shevyrnov¹, I. Yu. Botvich¹, D. V. Emelyanov¹, A. A. Larko¹,
G. S. Vysotskaya¹, V. K. Ivchenko², T. N. Demyanenko²

¹ Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: irina.pugacheva@mail.ru

² Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk 660049, Russia
E-mail: v.f.ivchenko@mail.ru

The paper presents the results of a study showing the possibility of recognition of soil cover with different types of soil and soil cultivation techniques by remote sensing methods. Satellite (Sentinel-2) and terrestrial (Spectral Evolution PSR-1100F) optical data of various spatial and spectral resolution were used. The data with a high heterogeneity of experimental plots were obtained in the Minderlinskoe experimental farm, Sukhobuzimsky district of the Krasnoyarsk Kray. It is established that measurements of spectral brightness coefficient (SBC) with high spectral resolution can be used to evaluate soil cultivation techniques and, in some cases, to identify soil types. The presence of stubble on soil surface

has a significant impact on the process of soil types identification. The biggest difference in soil species diversity can be established in the absence of stubble. Using remote sensing for determination of the “hydrometamorphized clay-illuvial agricultural chernozem” soil type with “plowing” processing is demonstrated. It is shown that data from channels 2, 3, 4, and 8 of Sentinel-2 and their spatial variability can be directly used to assess the types of soil treatment and agrophysical characteristics at the initial stage of the vegetation period (open surface).

Keywords: satellite and terrestrial research methods, agricultural land, Sentinel-2, soil

Accepted: 29.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-150-160

References

1. Borin A. A., Loshchina A. E., *Zavisimost' urozhainosti zernovykh kul'tur ot priemov agrotekhniki* (The relation of the yield of grain cultures on the method of agrotechnology), *Vladimirskii zemledelets*, 2015, No. 2(72), 2015, pp. 2–6.
2. Ivchenko V. K., Mikhailova Z. I., *Vliyanie razlichnykh obrabotok pochvy i sredstv intensivatsii na produktivnost' zernovykh kul'tur* (The effect of different soil treatment and funds of intensification on the productivity of grain crops), *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2017, No. 4, pp. 3–10.
3. Loshchinina A. E., *Urozhainost' kul'tur sevooborota pri razlichnykh sistemakh obrabotki pochvy* (The yields of crop rotation under various tillage systems), *Agrarnyi vestnik Verkhnevolzh'ya*, 2016, No. 1, pp. 22–27.
4. Okunev G. A., Rakhimov R. S., *Zonal'nye problemy resursosberegayushchikh tekhnologii v zemledelii* (na primere zernovogo kompleksa OAO “Ptitsefabrika Chelyabinskaya”) (Zonal problem saving technologies in agriculture (for example, the grain complex of JSC “Chelyabinsk Poultry Farm”)), *Fundamental'nye osnovy nauchno-tekhnicheskoi i tekhnologicheskoi modernizatsii APK* (Fundamentals of Scientific, Technical and Technological Modernization of the Agricultural Sector), Proc. All-Russia Scientific and Practical Conf., Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2013, pp. 253–263.
5. Okunev G. A., Kuznetsov N. A., Kanatpaev S. S., *Resursosberegayushchie tekhnologii — rezerv povyshe-niya effektivnosti zemledeliya* (Resource saving technologies is a reserve of agriculture efficiency increase), *APK Rossii*, 2017, Vol. 24, No. 1, pp. 136–141.
6. Kholzakov V. M., *Resursosberegayushchie tekhnologii v zemledelii* (Resource saving technologies in agriculture), *Vestnik Izhevskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2007, No. 3(13), pp. 2–3.
7. Shishov L. L., Tonkonogov V. D., *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii* (Classification and diagnostics of soils in Russia), Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p.
8. Baret F., Guyo G., *Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment*, *Remote Sensing of Environment*, 1991, Vol. 35, pp. 161–173.
9. Jordan C. F., *Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor*, *Ecology*, 1969, Vol. 50, pp. 663–666.
10. Wolf A., *Using WorldView-2 Vis-NIR multispectral imagery to support land mapping and feature extraction using normalized difference index ratios*, *Proc. SPIE*, Vol. 8390, 2012.