

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА С ПОМОЩЬЮ ПОРТАТИВНОГО СПЕКТРО-РАДИОМЕТРА

Оперативное определение содержания органического вещества с заданной точностью в верхнем (плодородном) слое почвы необходимо для грамотного управления сельскохозяйственным производством. Использование спектральной отражательной способности почв в видимой и ближней инфракрасной области спектра является одним из самых перспективных оперативных методов для определения содержания органического вещества. Преимуществами метода являются: быстрота проведения съемки, относительная дешевизна, меньшая трудоемкость при подготовке образцов, отсутствие необходимости специальной обработки химическими реактивами и т. п.

Проведено определение спектров отражения в видимом и инфракрасном диапазоне естественных и антропогенно измененных почв Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги с использованием портативного спектро-радиометра. Выявлено наличие зависимостей между содержанием органического углерода и спектральной отражательной способностью образцов в видимом и инфракрасном диапазоне. Показано, что наилучшие результаты для предсказания содержания органического углерода в ненарушенных гумусовых горизонтах получаются при использовании коэффициента отражения Карманова ($R^2 = 0,41$). Для пахотных горизонтов зависимости оказались тоже значимыми, но в целом ниже: $R^2 = 0,21 - 0,22$. Вегетационный индекс NDVI способен объяснить около 26% варьирования содержания органического углерода в верхнем минеральном горизонте почвы вне зависимости от землепользования.

Проведенное исследование показало наличие потенциальной возможности использования съемки отражательной способности верхнего гумусового горизонта с использованием портативного спектро-радиометра для оперативного определения содержания органического углерода для целей сельскохозяйственного, агроэкологического и почвенного картографирования. Однако отмечено, что требуется разработка, калибровка и настройка методик для каждой конкретной территории.

Ключевые слова: содержание органического углерода, отражательная способность, спектро-радиометр, NDVI

В последние годы, спектральная отражательная способность почв в видимой и ближней инфракрасной области рассматривается в качестве перспективного метода изучения органического вещества почвы. По сравнению с аналитическими методами, методы, основанные на определении спектральной отражательной способности почв в видимой и ближней инфракрасной области, быстрее и дешевле, менее трудоемки при подготовке образцов, не требуют специальной обработки химическими реактивами и т. п. [16]. Помимо органического вещества, на отражательную способность почв в видимой или ближней инфракрасной области оказывают влияние такие свойства почв как влажность, размер частиц, минералогический состав, в том числе содержание железа и т. п. [14]. Такие условия внешней среды, как освещенность, облачность, наличие теней, неровность поверхности, точность позиционирования [7] и другие затрудняют использование спектроскопии в видимом и инфракрасном диапазоне длин волн в полевых исследованиях.

В работе Васкеса и других авторов приведен обзор исследований в области изучения связи между содержанием и/или запасами органического вещества почвы и результатами спектроскопирования в видимой или ближней инфракрасной области [15]. Авторами этих исследований для оценки связей использовались различные техники сглаживания, удаления шума, многомерные методы исследования, например, многомерная линейная регрессия и методы интеллектуального анализа данных (data mining), такие, например, как регрессионные деревья, нейронные сети и др. Полученные значения коэффициентов детерминации (R^2) варьировали от 0,45 до 0,93 [15].

Особенностью всех этих работ является то, что они охватывают обширные территории, где представлено большое разнообразие типов почв от малогумусных почв, до почв богатых гумусом. Целью данной работы было исследовать возможность оперативного определения содержания органического углерода верхнего гумусового горизонта для небольшой террито-

рии части хозяйства с относительно однородным почвенным покровом при помощи портативного спектро-радиометра.

Объекты и методы

Ключевой участок расположен в северном агроклиматическом районе Удмуртской Республики и располагается в пределах Вятско-Камской провинции дерново-подзолистых почв южной тайги [1]. Климат умеренно-континентальный. Естественная растительность ключевого участка представлена в основном пихтово-еловыми и темными сосновыми лесами со значительной примесью березы [2]. Площадь пашни составляет 65% территории, леса занимают 24%, пойменные луга занимают 5%, остальная территория (6%) занята приусадебными участками и овражно-балочной сетью. Почвообразующие породы представлены тяжелосуглинистыми покровными красновато-бурыми суглинками. Под ними залегают моренные отложения, содержащие гальку, которые в некоторых местах выходят наружу [4]. Рельеф ключевого участка увалистый сильно расчленен овражно-балочной сетью. Максимальный перепад высот в пределах участка составляет 65 м. Работами почвоведов Удмуртского государственного университета и Ижевской государственной сельскохозяйственной академии было показано, что рельеф в сочетании с особенностями почвообразующих пород, оказывает решающее значение на формирование почвенного покрова исследуемой территории [4] (рис. 1).

Ключевой участок охватывает примерно половину площади хозяйства ООО «Чура» и занимает 19 км². Основное направление деятельности данного хозяйства – мясное животноводство. На полях хозяйства выращивается пшеница яровая, ячмень яровой и овес, а также горох. Часть

полей засеивается однолетними и многолетними травами. Все водоразделы и приводораздельные склоны распаханы. Балочные понижения покрыты лесами и кустарником. На первой и второй террасах реки Кыпка, которая пересекает территорию ключевого участка с северо-востока на юго-запад, расположен населенный пункт Кыпка, а также комплекс по выращиванию молодых бычков. На выровненных участках поймы расположены сенокосы.

Основные изучаемые типы почв на исследуемой территории – дерново-подзолистые, серые лесные ненарушенные и разной степени нарушенности почвы, а также дерново-глеевые почвы.

В 2014–2015 гг. в рамках полевых исследований ключевого участка была заложена серия прикопок: 60 из обследованных точек располагались на территории пашни, а 17 точек на ненарушенных территориях. В точках обследования были диагностированы преимущественно дерново-подзолистые почвы разной степени смывости, часть почв относилась к типу серых лесных почв, 4 точки были представлены дерново-глеевыми почвами днищ балок (рис. 1).

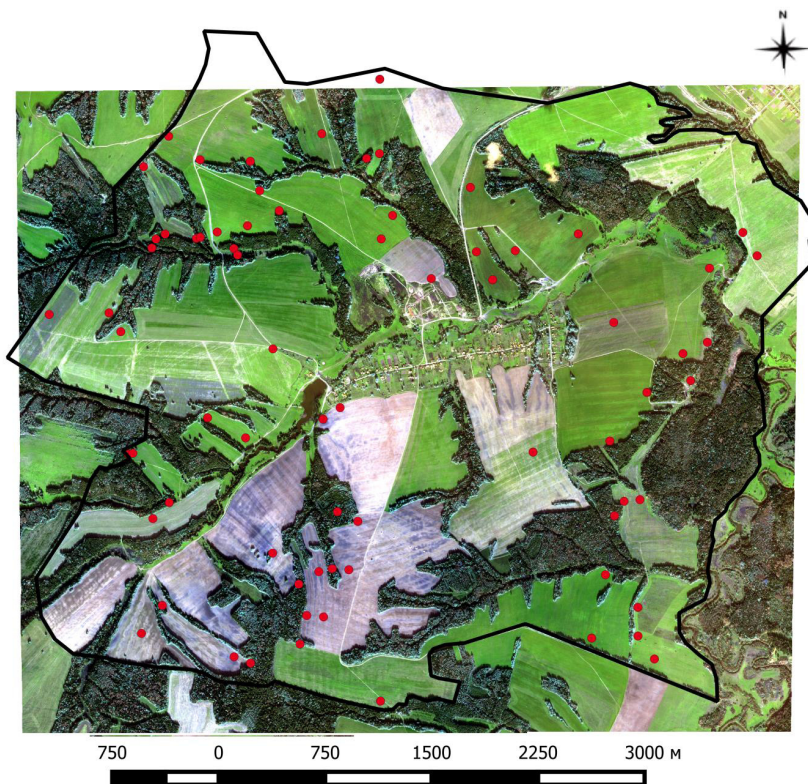


Рисунок 1 – Точки обследования части хозяйства ООО «Чура»

В каждой точке из верхнего гумусового горизонта (0–20 см) отбирались почвенные образцы, которые впоследствии доводились до воздушно-сухого состояния. В каждом почвенном образце определялось содержание органического углерода методом каталитического сжигания. Анализ проводился на элементном анализаторе VARIO EL III в лаборатории Биологии и биохимии почв ФГБНУ Почвенного института имени В.В. Докучаева.

Спектры отражения воздушно-сухих образцов были сняты в двукратной повторности с использованием портативного спектро-радиометра FieldSpecHandHeld 2 ASD, измеряющего отражение в диапазоне длин волн от 325 нм до 1075 нм при спектральном разрешении ± 1 нм [10].

Полученные кривые отражательной способности почвенных образцов были сглажены методом «скользящего среднего» с окном 7. Для проведения этой операции была использована функция `movav` библиотеки `prospectr` программной среды R. Далее проводилось усреднение значений отражательной способности двух повторностей для каждой длины волны и удаление значений отражательной способности для длин волн меньше 400 нм и больше 900 нм, в связи с тем, что в этих частях спектра электромагнитного излучения при измерении образцов наблюдаются помехи. Для свертки информации и поиска зависимостей между содержанием органического углерода и отражательной способностью образца были использованы вегетационные индексы и спектральные отношения:

1) значения отражательной способности почвенного образца для длины волны 750 нм [5]; 2) интегральный коэффициент отражения по формуле Карманова [3], [5]; 3) различные отношения красного (683 нм), зеленого (533 нм), синего (433 нм) и инфракрасного (850 нм) каналов; 4) нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI [6], [8], [9], [13]; 5) разностный вегетационный индекс DVI [12]; 6) второй модифицированный почвенный вегетационный индекс MSAVI [11].

Результаты и обсуждение

Обнаружено, что регрессионное уравнение зависимости содержания органического углерода в образцах ненарушенных гумусовых горизонтов от отражательной способности образца при длине волны 750 нм имеет экспоненциальный вид $y = 3,7964e^{-3.838x}$, где y – содержание органического углерода, а x – отражательная способность при длине волны 750 нм, R^2 составил 0,34 (рис. 2).

Это показывает, что около 34% варьирования содержания органического углерода в гумусовых горизонтах ненарушенных территорий можно спрогнозировать путем измерения отражательной способности этих образцов при длине волны 750 нм. Для пахотных горизонтов регрессионное уравнение имело вид $y = 1,9887e^{-2.906x}$, а R^2 равнялся 0,22, так что лишь пятая часть содержания органического углерода в образцах из пахотных горизонтов может быть объяснена через отражательную способность при длине волны 750 нм.

Регрессионное уравнение зависимости содержания органического углерода в образцах ненарушенных гумусовых горизонтов от интегрального коэффициента отражения Карманова имеет вид $y = 3,4891e^{-5.634x}$ ($R^2 = 0,41$), т. е. около 41% варьирования содержания органического углерода в образцах ненарушенных почв объясняется этим соотношением. Для пахотных горизонтов регрессионное уравнение имело вид $y = 1,8094e^{-4.029x}$ ($R^2 = 0,21$) (рис. 3).

Индекс NDVI объясняет около 26% варьирования содержания органического углерода в образцах, регрессионное уравнение зависимости содержания органического углерода от NDVI имеет вид $y = 0,45e^{5.9637x}$ ($R^2 = 0,2573$) (рис. 4). При этом различий для естественных и пахотных почв не наблюдается.

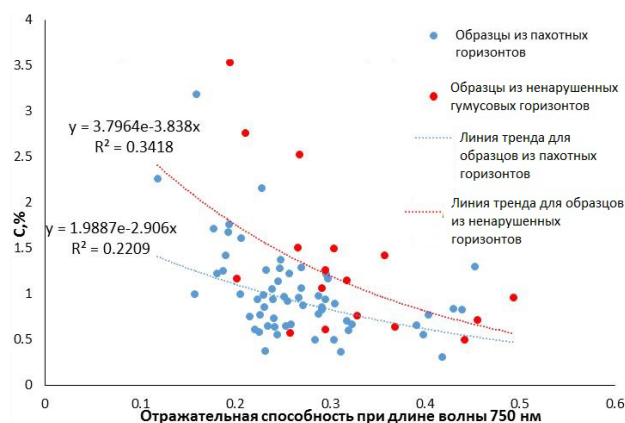


Рисунок 2 – Зависимость содержания органического углерода от отражательной способности при длине волны 750 нм

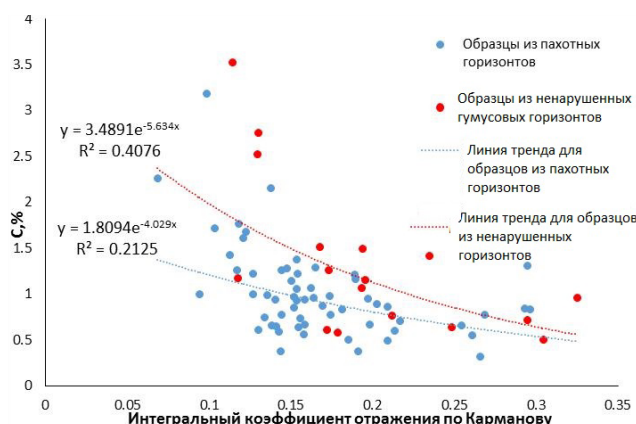


Рисунок 3 – Зависимость содержания органического углерода от интегрального коэффициента Карманова

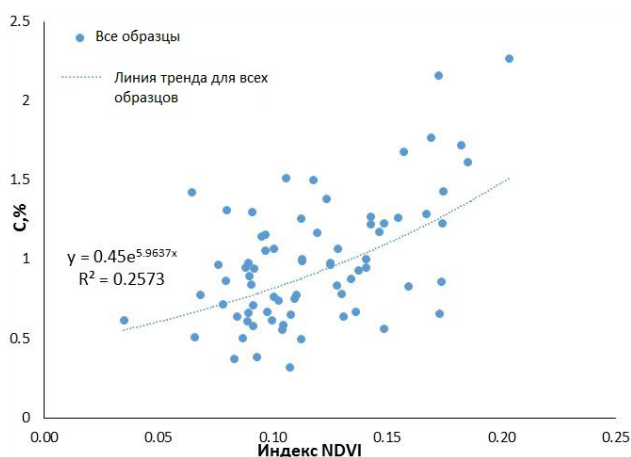


Рисунок 4 – Зависимость содержания органического углерода от индекса NDVI

Различные отношения красного, зеленого, синего и инфракрасного каналов, индексы DVI и MSAVI не дали значимых корреляций с содержанием органического углерода.

На получение нами «хороших» кривых зависимостей содержания органического углерода от отражательной способности, как в работах некоторых авторов [15], [16], возможно

повлияли следующие факторы: отсутствие измельчения образцов перед съемкой спектро- радиометром, приборные погрешности при измерении содержания органического углерода и отражательной способности, высокое содержание железа в почвообразующих породах, которое способствует повышенному содержанию железа и красноватому оттенку отобранных нами образцов.

Выводы

Отмечено наличие зависимостей между содержанием органического углерода и спектральной отражательной способностью образцов в видимом и инфракрасном диапазоне, измеренной при помощи портативного спектро- радиометра.

Выявлено, что наилучшие результаты для предсказания содержания органического углерода в естественных гумусовых горизонтах получены при использовании коэффициента отражения Карманова, при этом R^2 составил 0,41.

Показано, что для пахотных горизонтов зависимости оказались тоже значимыми, но в целом ниже: $R^2=0,21-0,22$.

Выявлено, что индекс NDVI способен объяснить около 26% варьирования содержания органического углерода в исследованных образцах ($R^2=0,26$).

Показана потенциальная возможность использования съемки отражательной способности верхнего гумусового горизонта для оперативного определения содержания органического углерода для целей сельскохозяйственного, агроэкологического и почвенного картографирования. Однако требуется разработка, калибровка и настройка методик для каждой конкретной территории.

07.10.2016

Работа выполнена при финансовой поддержки гранта РНФ №15-16-30007 и гранта Ведущей научной школы № 10347.2016

Список литературы:

1. Добровольский, Г.В. География почв. 2-е изд., перераб. и доп. / Г.В. Добровольский, И.С. Урусевская. – М.: Колос, 2004. – 458 с.
2. Растительность / Т.П. Ефимова и др. // Природа Удмуртии. – Ижевск, 1972. – С. 145–201.
3. Карманов, И.И. Спектральная отражательная способность и цвет почв, как показатели их свойств / И.И. Карманов. – М.: Колос, 1974. – 351 с.
4. Ковриго, В.П. Почвы Удмуртской Республики / В.П. Ковриго. – Ижевск: РИО Ижевская ГСХА, 2004. – 490 с.

5. Орлов, Д.С. Спектральная отражательная способность почв и их компонентов / Д.С. Орлов, Н.И. Суханова, М.С. Розанова. – М.: Изд-во МГУ. – 2001. – 176 с.
6. Савин, И.Ю. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) / И.Ю. Савин, Э.Р. Танов, С. Харзинов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – М.: изд-во Почв. ин-т им. В.В. Докучаева. – 2015. – №77. – С. 51–65.
7. Самсонова, В.П. Влияние ошибки позиционирования точек опробования на оценку связи между яркостью в ИК канале космического снимка сверхвысокого разрешения и почвенными свойствами на примере типичного угодья Брянского ополья / В.П. Самсонова, Ю.Л. Мешалкина, Ю.Н. Благовещенский // Почвоведение. – 2013. – №5. – С. 1–7.
8. Jordan, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor / C.F. Jordan // Ecology. – 1969. – Vol. 50. – Pp. 663–666.
9. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition / F.J. Kriegler et al. // Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment. – University of Michigan, Ann Arbor, MI, 1969. – Pp. 97–131.
10. Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain / Li F. et al. // Field Crop Research. – 2008. – Vol. 106. – Issue 1. – Pp. 77–85.
11. Qi, J. External factor consideration in vegetation index development / J. Qi, Y. Kerr, A. Chehbouni // Proc. of Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, ISPRS, 1994. – Pp. 723–730.
12. Richardson, A.J. Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity / A.J. Richardson, J.H. Everitt // Geocarto International. – 1992. – Vol. 1. – Pp. 63–69.
13. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J.W. Rouse et al. // Third ERTS Symposium, NASA SP-351. – 1973. – Vol. 1. – Pp. 309–317.
14. Shepherd, K.D. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties / K.D. Shepherd, M.G. Walsh // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2002. – Vol. 66. – Pp. 988–998.
15. Vasquesa, G.M. Comparison of multivariate methods for inferential modeling of soil carbon using visible/near-infrared spectra / G.M. Vasquesa, S. Grunwald, J.O. Sickman // Geoderma. – 2008. – Vol. 146. – Issues 1–2. – Pp. 14–25.
16. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties / R.A. Viscarra Rossel et al. // Geoderma. – 2006. – Vol. 131. – Pp. 59–75.

Сведения об авторах:

Докучаев Павел Михайлович, аспирант кафедры общего земледелия и агроэкологии факультета почвоведения
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, факультет почвоведения,
e-mail: pashadokuchaev@gmail.com

Мешалкина Юлия Львовна, старший научный сотрудник кафедры общего земледелия и агроэкологии
факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
кандидат сельскохозяйственных наук
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, факультет почвоведения, тел. (495) 9393524,
e-mail: jlmesh@list.ru