

УДК 528.88(15);631.4

С.Л. Кравцов, Л.В. Орешкина

## ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВЕ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Рассматриваются спектральные свойства почвы, а также существующие методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) по оценке концентрации органических веществ в почве. Приводится пример оценки концентрации органических веществ в почве методами ДЗЗ.*

### Введение

Концентрация органических веществ в почве определяет ее плодородие и физические свойства, обуславливает действие многих гербицидов, способность почвы адсорбировать питательные вещества растительности, а также доступный ей азот [2, 4]. Хотя пространственно-временная изменчивость концентрации органических веществ в почве не так значительна, как содержание влаги, пространственное варьирование концентрации очень велико.

Для оценки пространственного распределения концентрации органических веществ могут быть использованы методы ДЗЗ. По сравнению со взятием образцов почвы методом сетки, основное преимущество методов ДЗЗ состоит в более низкой стоимости и более высокой детальности описания пространственного изменения концентрации органических веществ в почве.

### 1. Спектральные свойства почвы

На спектр почвы влияют следующие основные (часто тесно взаимосвязанные) факторы: текстура, содержание влаги, концентрация органических веществ и состав минералов [1]. На спектр почвы также оказывают влияние соленость, наличие окиси/гидроокиси железа и марганца, корки почв (вследствие изменения структуры и распределения размера частиц), температура почвы и т. д. В целом особенности спектров почв в видимой (0,4–0,7 мкм) и ближней (0,7–3,0 мкм) ИК-областях спектра связаны с физико-химическими свойствами, а также свойствами эмиссии. Особенности же спектра в дальней (8–14 мкм) ИК- и микроволновой областях спектра обусловлены температурными и гидрологическими режимами почв. Одной из наиболее важных характеристик спектра сухих почв является возрастание значения коэффициента отражения с увеличением длины волны, особенно в видимой и ближней ИК-областях спектра. Поэтому для почв характерны оттенки красного и коричневого.

Под *текстурой* подразумевают соответствующие пропорции частиц глины, пыли и песка в почве. Частицы диаметром менее 0,002 мм – это глина, диаметром 0,002–0,05 мм – пыль и диаметром 0,05–2,0 мм – песок. Соответствующие пропорции этих компонент определяют название текстуры (песчанистая глина, пылеватый суглинок и т. д.), которое дается отдельному виду почвы. Зависимость между размером частиц почвы и содержанием в ней влаги значительно влияет на спектр почв. Благодаря очень маленькому размеру частиц (например, в глинистых почвах) они расположены очень близко друг к другу. С другой стороны, из-за больших размеров частиц песка воздушное пространство между ними больше, а это делает возможным перемещение большего количества воздуха или воды через песчаные почвы по сравнению с глинистыми почвами. Небольшие размеры (по сравнению с песком) частиц пыли и глины позволяют им удерживать значительное количество воды, даже когда почва находится в сухом состоянии. Это проявляется в уменьшении значения коэффициента отражения в полосах поглощения воды на спектрах всех полевых и сухих глинистых почв.

Кроме того, при постоянстве других факторов с уменьшением размера частиц поверхность почвы становится более гладкой и отражает больше падающей энергии. Увеличение размера частиц уменьшает коэффициент отражения – свет оказывается пойманным в ловушки, образованные грубыми частицами. Так, было установлено [1], что возрастание размера частиц от 0,022 до 2,65 мм увеличивает поглощение солнечного излучения на 14 %.

Увеличение *содержания влаги* в почве обычно уменьшает ее коэффициент отражения, оказывая равное влияние по всему спектру (рис. 1, а). Наиболее значительное уменьшение значения коэффициента отражения происходит в полосах поглощения воды около 1,4, 1,9 и 2,7 мкм. Вместе с тем дальнейшее увеличение содержания влаги в почве не всегда вызывает соответствующее уменьшение значения коэффициента отражения. Это явление иллюстрируют одинаковые значения коэффициента отражения на более коротких длинах волн.

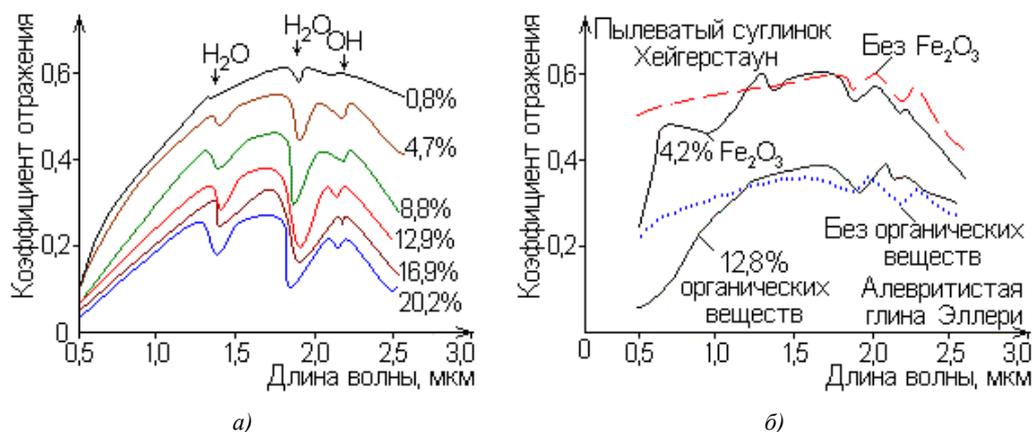


Рис. 1. Влияние на спектр почвы содержания в ней: а) влаги (пылеватый суглинок Ньютона; содержание глины – 27 %); б) окиси железа и органических веществ

Особенности спектра почвы зависят также от состава *минералов глины* (каолинита, монтмориллонита, галлузита, серпентина и т. д.), которые представляют собой особую группу минералов (глинистые минералы) и составляют около 50–60 % объема и до 90–97 % массы почвы. Глинистые минералы обладают высокими сорбционными свойствами, большой емкостью катионного и анионного обмена, способностью к набуханию и удержанию воды, позволяющими почве удерживать практически все поступающие в нее химические элементы и соединения. Спектральные особенности минералов глины обусловлены присутствием специфических химических элементов или ионов, зарядом ионов некоторых элементов и геометрией связей между определяющими кристаллическую структуру химическими элементами [7].

В торфяных почвах *органические вещества* могут преобладать, в большинстве же видов почв их количество не превышает нескольких процентов. В состав органических веществ почвы входят как растительные и животные остатки, не утратившие черт анатомического строения, так и отдельные химические соединения, называемые гумусом (продукт переработки растительных и животных организмов). Органические вещества косвенно затрагивают спектр, изменяя структуру почвы и способность удержания воды. Концентрация органических веществ более 2 % оказывает маскирующее влияние, снижая значение коэффициента отражения почвы во всем диапазоне и уменьшая (а иногда полностью затеняя) полосы поглощения (рис. 1, б). Почвы же с высокой концентрацией органических веществ (более 20 %) имеют более низкое значение коэффициента отражения во всем диапазоне 0,4–2,5 мкм [1]. Напротив, почвы с меньшей концентрацией органических веществ имеют более высокое значение коэффициента отражения и более сильные полосы поглощения.

Красный цвет многих почв обычно обусловлен наличием в них негидратированной *оксида железа* (в основном Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), хотя частично гидратированная окись железа и двуокись марганца также могут быть причиной красного цвета почвы. Увеличение содержания окиси железа может вызвать значительное уменьшение (до 40 %) значения коэффициента отражения, особенно в видимой области спектра. На рис. 1, б видно, что удаление окиси железа из почвы вызывает заметное увеличение значения коэффициента отражения в диапазоне 0,5–1,1 мкм, но при длинах волн более 1,1 мкм оно практически не изменяется.

Таким образом, в видимой области спектра увеличение содержания влаги вызывает уменьшение значения коэффициента отражения, текстура почвы вызывает увеличение значения коэффициента отражения при уменьшении размера частиц, увеличение концентрации органических веществ вызывает уменьшение значения коэффициента отражения.

нических веществ и окиси железа вызывает уменьшение значения коэффициента отражения. Однако многие из этих факторов тесно взаимосвязаны. Например, зависимость между уменьшением значения коэффициента отражения и увеличением концентрации органических веществ имеет место главным образом для почв, в которых она превышает 1,5 %. Если же концентрация органических веществ в почве менее 1,5 %, то содержание в ней окиси железа значительно влияет на значение коэффициента отражения.

## 2. Предпосылки и ограничения оценки концентрации органических веществ в почве методами ДЗЗ

Предпосылкой использования методов ДЗЗ является связь спектральной отражательной способности с концентрацией органических веществ в верхнем слое воздушно-сухой почвы. В видимой и ближней ИК-областях спектра (0,4–1,2 мкм) значение коэффициента отражения хорошо коррелирует и уменьшается с ростом концентрации органических веществ в почве [1, 5]. Наибольшие различия значений коэффициента отражения между почвами с высокой концентрацией органических веществ и с их отсутствием наблюдаются в красной области спектра (0,68–0,70 мкм), а сравнительно высокий контраст между ними (более 0,2–0,3) прослеживается во всем диапазоне 0,48–0,86 мкм (рис. 2 [1]). Целесообразность красной области спектра (0,64–0,72 мкм) для оценки концентрации органических веществ в почве обусловлена еще и тем, что в этом интервале значение коэффициента отражения окиси железа значительно превышает (на 0,08–0,12) значение коэффициента отражения гуминовых кислот, резко усиливая вклад последних в понижение значения коэффициента отражения с увеличением концентрации органических веществ и, следовательно, повышая достоверность ее определения. В ближней ИК-области спектра различия значений коэффициента отражения почв с высокой концентрацией органических веществ и их отсутствием к длине волны 1,2 мкм затухают. Более того, в ближней ИК-области спектра (1,5–2,4 мкм) значение коэффициента отражения почвы с высокой концентрацией органических веществ (более 10 %) может быть несколько ниже (на 0,04), чем почвы без органических веществ.

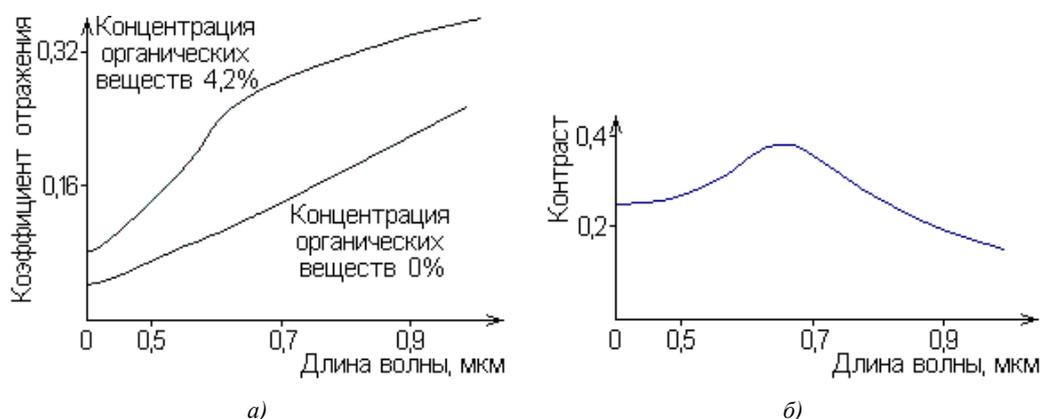


Рис. 2. Влияние концентрации органических веществ в почве на ее спектр: а) спектр почв с концентрацией органических веществ 0 и 4,2 %; б) различие спектров почв с концентрацией органических веществ 0 и 4,2 %

При малой концентрации органических веществ (менее 1 %) большая часть минеральных частиц обнажена. В этих условиях значение коэффициента отражения определяется составом минералов глины и наблюдается большой разброс ввиду неоднородного минералогического и химического состава породы. Увеличение концентрации органических веществ резко уменьшает открытую поверхность светлых механических частиц. При умеренной концентрации органических веществ (ОМ примерно равной 1–4 %) их коллоиды все больше и больше покрывают эти частицы. Как только последние полностью покроются тонким слоем органических веществ (при ОМ примерно равной 5–6 %), дальнейшее увеличение их концентрации лишь незначительно уменьшает значение коэффициента отражения почвы [1].

Исходя из данных о зависимости значения коэффициента отражения от концентрации органических веществ ( $\kappa(\text{ОМ})$ ), градиента уменьшения значения коэффициента отражения с увеличением концентрации органических веществ ( $d\kappa/d\text{ОМ}$ ), точности регистрации значения коэффициента отражения и его дисперсии ( $\sigma_p$ ), можно определить количество градаций ОМ, различаемых с требуемой вероятностью в пределах однородной почвообразующей породы. Большие градиенты до  $0,8 \kappa/1\% \text{ ОМ}$  наблюдаются при концентрации органических веществ 0–1%. Точность регистрации значения коэффициента отражения 0,02 и предельно различимые градиенты  $0,02 \kappa/1\% \text{ ОМ}$  достигаются при концентрации органических веществ 5%. Далее градиент резко уменьшается до  $0,01 \kappa/1\% \text{ ОМ}$  при концентрации органических веществ примерно 6–8% и до менее  $0,001 \kappa/1\% \text{ ОМ}$  при концентрации органических веществ 10–20%. Таким образом, при концентрации органических веществ более 10–12% исключается даже теоретическая возможность ее оценки методами ДЗЗ. Кроме того, на количество различаемых градаций концентрации органических веществ влияет дисперсия  $\kappa(\text{ОМ})$ . Дисперсия увеличивается при низких значениях концентрации органических веществ (менее 1–2%), где  $\sigma_p$  достигает 0,03–0,04, и уменьшается при концентрации органических веществ 2–5%, где  $\sigma_p$  составляет 0,015–0,020. Благодаря высоким градиентам  $d\kappa/d\text{ОМ}$ , но большим дисперсиям  $\sigma_p$  при низкой концентрации органических веществ и умеренным градиентам, но и умеренным дисперсиям при средней концентрации органических веществ размер различаемых градаций несколько выравнивается в пределах всего интервала концентрации органических веществ 0–5(6)%.

В некоторых случаях максимально возможное количество различимых градаций концентрации органических веществ не используется. Количество градаций оптимизируется по пространственной частоте градаций концентрации органических веществ. В результате некоторые различные градации, пространственная частота которых менее 5%, генерализуются и за счет этого возрастает достоверность выделения всех укрупненных градаций. Однако протяженности градаций становятся неравновеликими. Например, малые концентрации органических веществ с градациями 0,5% могут быть объединены в одну 0–2 или 0–1,5%-ную, поскольку пространственная частота почв с низкой концентрацией органических веществ, как правило, невелика (1–4%).

Удовлетворительная точность  $\kappa(\text{ОМ})$  сохраняется в пределах одного вида или подвида почв. Таким образом, точность оценки концентрации органических веществ в почве по значению коэффициента отражения, как правило, является низкой для больших географических областей или областей со значительно изменяющимся рельефом [5].

Для исключения влияния содержания влаги съемка должна проводиться в сухое без дождей время при воздушно-сухом состоянии поверхности почвы. Более высокое содержание влаги вызывает ошибочное завышение оценки концентрации органических веществ, особенно в ложбинах и низинах, где содержание влаги выше воздушно-сухой даже в сухое время года [1, 3].

Влияние состава органических веществ связано главным образом с соотношением гуминовых и фульвокислот. Гуминовые кислоты отличаются наиболее низким значением коэффициента отражения (до 0,02–0,03). Фульвокислоты дают более высокое значение коэффициента отражения (до 0,04–0,06), особенно в оранжево-красной области спектра. Соотношение гуминовых и фульвокислот варьирует. Более значительна относительная концентрация последних в почвах аридных зон (каштановых и сероземных), а также в гумидных (бурых и серых лесных). В результате при одинаковой концентрации органических веществ и разной концентрации пигментов эти почвы светлее. Данный фактор исключается ограничением оценки концентрации органических веществ в пределах одного зонального вида почвы.

Наконец, велико влияние окиси железа, присутствие которой уменьшает значение коэффициента отражения почвы [1], что особенно сильно сказывается в почвах с низкой концентрацией органических веществ (1–2%). Это прослеживается вплоть до концентрации органических веществ 5–6% и может уменьшить значение коэффициента отражения почвы на 10–20%.

### 3. Существующие методы ДЗЗ оценки концентрации органических веществ в почве

К настоящему времени разработан ряд методов ДЗЗ оценки концентрации органических веществ, среди которых следует выделить методы Chen и SLED [2, 5]. Несмотря на различие подходов, результаты методов Chen и SLED схожи (до 90 %). Методы Chen и SLED являются специфическими для поля, так как значения коэффициентов регрессии соотношения между значениями яркости пикселей и концентрацией органических веществ зависят от вида почвы. При этом метод Chen не предлагает какого-либо подхода ко взятию образцов почвы.

Метод сетки заключается во взятии образцов почвы в случайным образом выбранных местоположениях по всему исследуемому полю. Взятые образцы почвы, как предполагают, соответственно представляют свойства почвы исследуемого поля. При этом, чтобы представить 0,405 га (1 акр) или большую область, рекомендуется брать сложный образец почвы из 80 ядер. Данная процедура может пропустить некоторые области высокой или низкой концентрации органических веществ, и даже если индивидуальные ядра соответственно представляют область, то сложный образец почвы не позволит описать изменения в ее пределах.

Как взятие, так и анализ образцов почвы методом сетки довольно трудоемкий и дорогой процесс. Например, методом сетки для области 115 га должно быть взято 280 образцов почвы при размере сетки 0,405 га. Для метода же Chen количество образцов почвы, необходимых для того, чтобы определить значения коэффициентов регрессии соотношения между концентрацией органических веществ и значениями яркости пикселей, уменьшается до 28 (в 10 раз) [2], а для метода SLED – до 7 (в 40 раз).

Методы Chen и SLED оценки концентрации органических веществ в почве реализуются следующим образом.

*Исходные данные.* Изображение ДЗЗ, содержащее каналы в красной, зеленой и синей областях спектра (для метода Chen) либо в красной и ближней ИК-областях спектра (для метода SLED), должно быть получено для условий голы (без какой-либо растительности) и сухой почвы исследуемого поля.

В исследуемом поле должны быть взяты два множества образцов почвы с измерением их местоположения (например, с помощью GPS-приемника). При этом должно быть достигнуто соответствие между точностью измерения местоположения образцов почвы, пространственным разрешением изображения и точностью его геокодирования. Выбор образцов почвы должен быть основан на изменении текстуры поверхности почвы, а также концентрации органических веществ в пределах различных текстур.

*Лабораторный анализ образцов почвы.* Определяется концентрация органических веществ, а также иные свойства (концентрация Fe, содержание влаги и др.) образцов почвы. Если коэффициенты изменения (среднее значение, разделенное на среднеквадратическое отклонение) других свойств почвы малы по сравнению с коэффициентом изменения концентрации органических веществ, то считается, что изменение других свойств почвы не оказало сколь-нибудь существенного влияния на результат.

*Соотношение между значениями яркости пикселей и концентрацией органических веществ* определяется следующим образом:

1. Для метода Chen с помощью первого множества образцов почвы определяются значения коэффициентов регрессии соотношения между концентрацией органических веществ и значениями яркости пикселей изображения [2, 5]:

$$OM_{(x,y)} = \exp\left(a + b \cdot I_{(x,y)}^R + c \cdot I_{(x,y)}^G + d \cdot I_{(x,y)}^B\right), \quad (1)$$

где  $OM_{(x,y)}$  – концентрация органических веществ в пикселе  $(x, y)$  почвы, %;  $(x, y)$  – координаты пикселя изображения;  $I_{(x,y)}^R$ ,  $I_{(x,y)}^G$ ,  $I_{(x,y)}^B$  – значения яркости пикселя  $(x, y)$  изображения для каналов красной, зеленой и синей областей спектра соответственно;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – коэффициенты регрессии.

2. Для метода SLED при исследовании поля определяются параметры линии почвы (наклон и точка пересечения, рис. 3 [4, 5]) с помощью всех пикселей (исключая области воды и значительной растительности) в пределах его границ [4–6]:

$$I_{(x,y)}^{NIR} = \alpha \cdot I_{(x,y)}^R + \beta, \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – наклон и точка пересечения линии почвы соответственно.

Линия почвы простирается от области наиболее темных почв с низкими значениями коэффициента отражения в каналах красной и ближней ИК-областей спектра (точка A на рис. 3) к области ярких почв с наиболее высокими значениями коэффициента отражения в каналах красной и ближней ИК-областей спектра (точка B на рис. 3). Вид почвы – основной фактор, определяющий наклон и точку пересечения линии почвы [5, 6].



Рис. 3. Концепция линии почвы: AB – линия почвы; C – пиксель с чистой растительностью; D – пиксель с частичной растительностью; R, NIR – соответственно красная и ближняя ИК-области спектра

С помощью первого множества образцов почвы определяются значения коэффициентов регрессии соотношения между расстоянием Евклида и концентрацией органических веществ [5]:

$$OM_{(x,y)} = a \cdot e^{-b \cdot D_{(x,y)}}, \quad (3)$$

где  $D_{(x,y)}$  – расстояние Евклида от пикселя  $(x, y)$  до точки минимума линии почвы;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты регрессии.

Как вариант метод SLED предлагает выбирать семь образцов почвы, которые соответствуют пикселям (среди всех пикселей исследуемого поля), наиболее близко расположенным к 1, 10, 25, 50, 75, 90 и 99 % расстояния Евклида между точками минимума и максимума линии почвы. Такие проценты соответствуют среднему расстоянию Евклида и нескольким критическим местоположениям вдоль линии почвы. Идентифицированные таким образом пиксели должны быть наложены на изображение для определения местоположения соответствующих им образцов почвы. Подобный выбор образцов почвы позволяет значительно уменьшить их количество лишь при незначительном уменьшении точности соотношения (3).

Оценка полученного соотношения (1) или (3) производится с использованием второго множества образцов почвы.

Оценка концентрации органических веществ. Для каждого пикселя исследуемого поля с помощью выражения (1) или (3) оценивается концентрация органических веществ. Далее полученные значения группируются в одну из заранее установленных градаций.

#### 4. Пример оценки концентрации органических веществ в почве методом ДЗЗ

*Исходные данные.* Поле для исследований было предоставлено сельскохозяйственным производственным кооперативом «Первомайский и К<sup>о</sup>» (СПК «Первомайский и К<sup>о</sup>») и располагалось в районе д. Слобода Смолевичского района Минской области (рис. 4). Поле имело плоский рельеф, его площадь составляла около 50 га. Исследуемое поле характеризовалось дерново-подзолистыми почвами на легких пылеватых суглинках.

Полевые испытания проводились 19 сентября 2006 г., после того как несколько дней стояла ясная, сухая, солнечная погода. Регистрация спектральных характеристик почвы осуще-

ствлялась многоканальным (восемь спектральных каналов) активным сенсором, перемещаемым со скоростью от 5 до 20 км/ч в почве на глубине 10–20 см (система была установлена на мини-тракторе «Беларусь 132Н») при полном отсутствии внешнего освещения. Было взято 10 образцов почвы на глубине 15–20 см с регистрацией спектральных характеристик (табл. 1). Выбор образцов почвы был основан на изменении текстуры поверхности почвы, а также концентрации органических веществ в пределах различных текстур. Местоположение образцов почвы и ее спектральных характеристик измерялось с помощью GPS-приемника (точность не хуже 3 м). Спектральные характеристики почвы регистрировались и во времени (временные отсчеты).

Лабораторный анализ образцов почвы был проведен в соответствии с ГОСТ 27753.10-88, пп. 4.1, 4.2 в сентябре 2006 г. на кафедре «Интеллектуальные системы» Белорусского национального технического университета совместно с лабораторией, аккредитованной на право проведения испытаний в Системе аккредитации лабораторий Республики Беларусь. Результаты лабораторного анализа представлены в табл. 1. Несмотря на воздушно-сухое состояние поверхности почвы, содержание влаги на глубине регистрации спектральных характеристик почвы (15–20 см) было велико (до 21,4 %). Таким образом, подобное применение методов ДЗЗ для оценки концентрации органических веществ нельзя считать удачным.

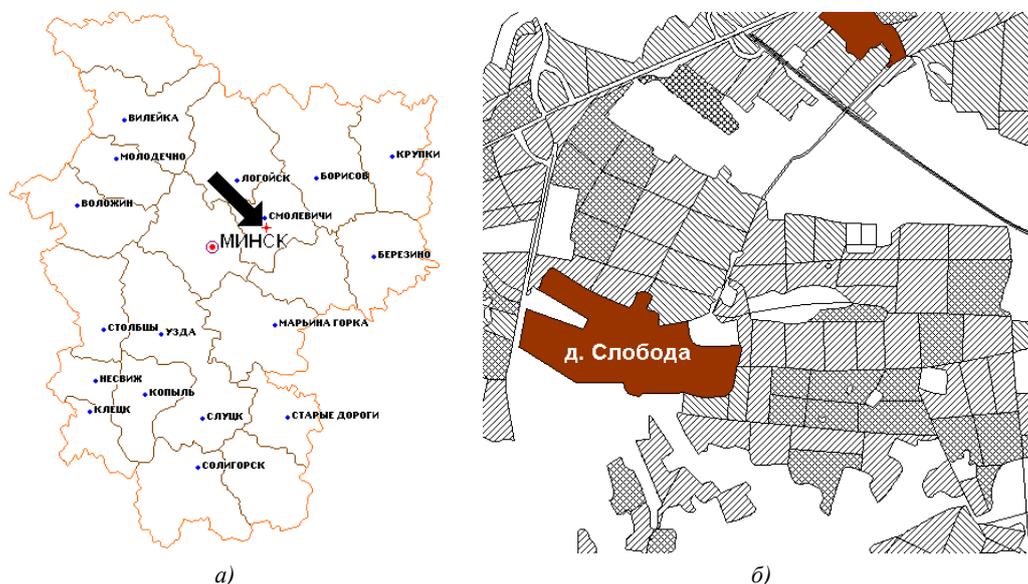


Рис. 4. Местоположение исследуемого поля:  
а) на карте Минской области; б) на план-схеме

Таблица 1

Характеристика множества образцов почвы

Номер образца почвы	Значения отражения по каналам								Концентрация органических веществ, %	Содержание влаги, %
	1 (0,850 мкм)	2 (0,650 мкм)	3 (0,630 мкм)	4 (0,590 мкм)	5 (0,525 мкм)	6 (0,465 мкм)	7 (0,405 мкм)	8 (0,375–0,625 мкм)		
1	414	558	414	412	685	436	511	402	4,6	18,8
2	393	654	402	399	702	414	474	377	6,1	21,4
3	414	639	416	409	688	417	498	386	4,0	15,7
4	423	1688	458	450	1365	458	517	442	4,7	18,8
5	413	699	419	416	702	413	469	386	1,1	4,8
6	417	630	414	417	696	414	486	378	3,5	10,6
7	436	604	406	412	702	431	515	409	0,8	2,8
8	504	643	431	424	743	490	641	491	1,0	2,6
9	415	632	415	401	695	404	472	379	3,2	20,0
10	406	628	408	410	689	411	463	376	4,0	19,2

Для множества образцов почвы значение коэффициента изменения содержания влаги было равно 1,876, значение коэффициента изменения концентрации органических веществ – 1,941.

Поэтому содержание влаги оказало некоторое влияние на точность оценки концентрации органических веществ в почве исследуемого поля.

Соотношение между значениями яркости временных отсчетов и концентрацией органических веществ было выражено в виде

$$OM_t = a_0 + a_1 \cdot I_{l_1,t} + a_2 \cdot I_{l_2,t} + a_3 \cdot I_{l_1,t} \cdot I_{l_2,t} + a_4 \cdot I_{l_1,t}^2 + a_5 \cdot I_{l_2,t}^2, \quad (4)$$

где  $OM_t$  – концентрация органических веществ в почве для временного отсчета  $t$ , %;  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – коэффициенты регрессии;  $l_1, l_2$  – каналы.

Значения коэффициентов регрессии соотношения (4) между концентрацией органических веществ и значениями яркости временных отсчетов были получены для различных комбинаций каналов методом наименьших квадратов с использованием множества из 10 образцов почвы (табл. 2).

Таблица 2

Параметры соотношения между концентрацией органических веществ и значениями яркости временных отсчетов

Каналы		Коэффициенты регрессии						СКО ( $r$ )
$l_1$	$l_2$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	
1	2	514,826	-1,686	-0,4	$8,598 \times 10^{-4}$	$1,21 \times 10^{-3}$	$1,663 \times 10^{-5}$	0,491 (0,957)
3	2	$-2,601 \times 10^3$	7,087	3,605	$-9,958 \times 10^{-3}$	$-9,812 \times 10^{-4}$	$4,138 \times 10^{-4}$	0,553 (0,946)
4	2	$-2,485 \times 10^3$	6,664	3,555	$-9,691 \times 10^{-3}$	$-7,098 \times 10^{-4}$	$3,494 \times 10^{-4}$	0,903 (0,847)
5	2	-121,462	0,912	-0,578	$1,632 \times 10^{-3}$	$-1,41 \times 10^{-3}$	$-4,482 \times 10^{-4}$	1,255 (0,674)
6	2	176,956	-0,622	-0,067	$3,922 \times 10^{-5}$	$6,257 \times 10^{-4}$	$2,24 \times 10^{-5}$	1,346 (0,611)
7	2	262	-0,546	-0,339	$6,169 \times 10^{-4}$	$1,192 \times 10^{-4}$	$9,576 \times 10^{-6}$	1,254 (0,675)
8	2	-119,639	-0,292	0,705	$-2,351 \times 10^{-3}$	$2,043 \times 10^{-3}$	$1,472 \times 10^{-4}$	0,855 (0,864)

Примечание: СКО – среднеквадратическое отклонение;  $r$  – коэффициент корреляции.

Оценка полученного соотношения проводилась по множеству из 10 образцов почвы (смещенная оценка). Значение среднеквадратического отклонения находилось в диапазоне от 0,491 (для каналов красной и ближней ИК-областей спектра) до 1,346 (для каналов красной и синей областей спектра). Значение коэффициента корреляции находилось в диапазоне от 0,957 (для каналов красной и ближней ИК-областей спектра) до 0,611 (для каналов красной и синей областей спектра).

Как и ожидалось, наилучшие значения среднеквадратического отклонения и коэффициента корреляции были для каналов красной и ближней ИК-областей спектра (рис. 5). Было хорошее соответствие между измеренными и предполагаемыми значениями концентрации органических веществ с  $r = 0,957$  и наклоном линии линейной регрессии, близким к 1 (рис. 5, б). Среднеквадратическое отклонение составило менее 0,5 % (относительная ошибка – около 5–7 %).

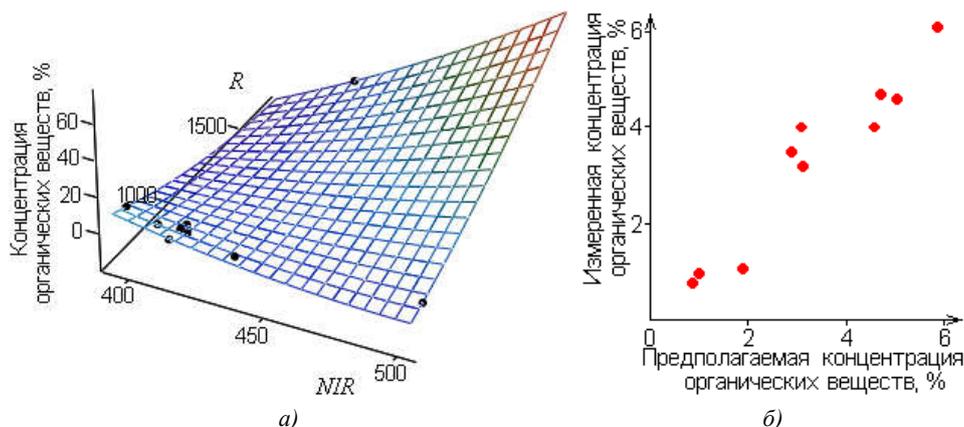


Рис. 5. Оценка соотношения между концентрацией органических веществ и значениями яркости множества из 10 образцов почвы: а) значения и интерполирующая поверхность между концентрацией органических веществ и значениями яркости множества; б) линейное соотношение между измеренной и предполагаемой концентрациями органических веществ для множества

Оценка концентрации органических веществ для каждого временного отсчета на участках 3 и 5 проводилась с использованием выражения (4) (рис. 6). Всплеск значения концентрации органических веществ в начале участка 5 обусловлен, по всей видимости, сбоем системы в процессе входа в землю многоканального сенсора. В целом же полученные значения концентрации органических веществ находятся в физически обоснованных пределах.

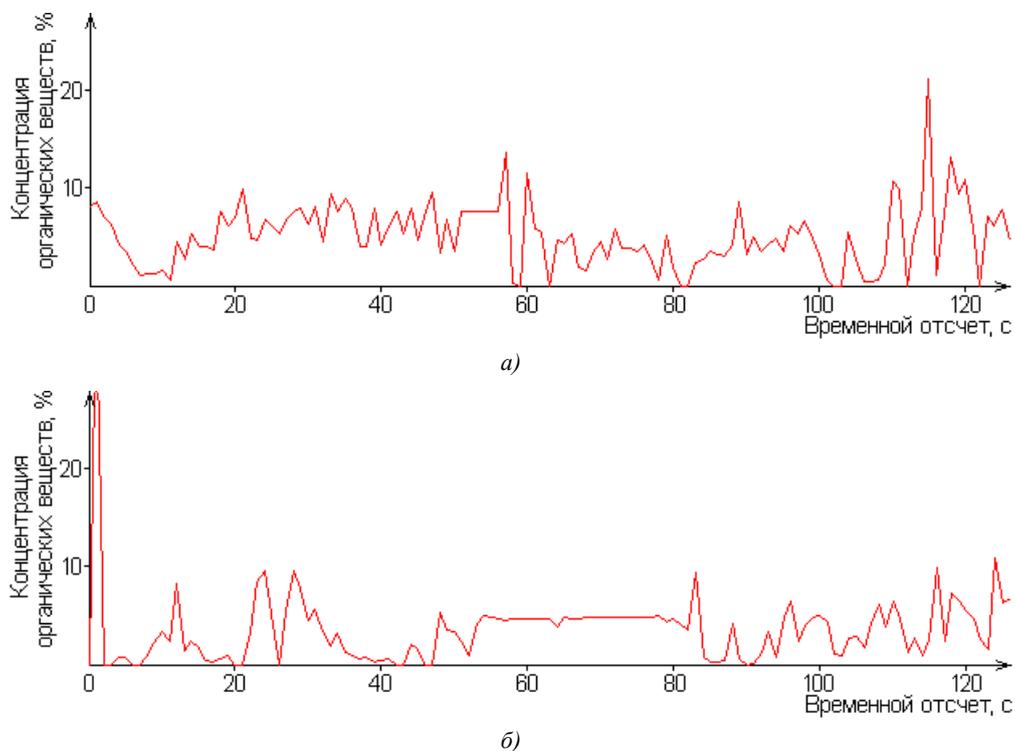


Рис. 6. Зависимость значения концентрации органических веществ от временных отсчетов: а) участок 3; б) участок 5

### Заключение

Исследования на поле СПК «Первомайский и К<sup>0</sup>» в районе д. Слобода Смолевичского района Минской области показали хорошее соответствие между измеренными (результат лабораторного анализа) и предполагаемыми (результат анализа данных ДЗЗ) значениями концентрации органических веществ. Как и ожидалось, наилучшие значения среднеквадратического отклонения (0,491 %) и коэффициента корреляции (0,957) получены при использовании каналов красной и ближней ИК-областей спектра. Такие оптимистические результаты обусловлены прежде всего смещенным характером оценки, близким к минимальному количеству образцов почвы, а также однородными свойствами почвы в пределах исследуемого поля. Вместе с тем необходимо продолжить дальнейшие исследования, прежде чем внедрить в практику растениеводства методы ДЗЗ для оценки пространственного распределения концентрации органических веществ.

Авторы выражают благодарность С.В. Решетнику, а также Н.И. Мурашко за предоставление исходных данных по проведенным ими исследованиям на поле СПК «Первомайский и К<sup>0</sup>».

### Список литературы

1. Виноградов, В.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем / В.В. Виноградов. – М. : Наука, 1984. – 320 с.
2. Field-scale mapping of surface soil organic carbon using remotely sensed imagery / F. Chen [et al.] // Soil science society of America journal. – 2000. – Vol. 64. – P. 746–753.

3. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra / A.M. Mouazen [et. al.] // Soil science society of America journal. – 2006. – Vol. 70. – P. 1295–1302.
4. An automated soil line identification routine for remotely sensed images / G.A. Fox [et al.] // Soil science society of America journal. – 2004. – Vol. 68. – P. 1326–1331.
5. Fox, G.A. Estimation of soil organic matter from red and near-infrared remotely sensed data using a soil line Euclidean distance technique / G.A. Fox, G.J. Sabbagh // Soil science society of America journal. – 2002. – Vol. 66. – P. 1922–1929.
6. Jasinski, M.F. The structure of red-infrared scattergrams of semivegetated landscapes / M.F. Jasinski, P.S. Eagleson // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 1989. – Vol. 27, № 4. – P. 441–451.
7. Introduction to hyperspectral imaging with TNTmips. – USA, Lincoln : MicroImages Inc, 2006. – 24 p.

Поступила 18.02.09

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: Krautsou\_sl@rambler.ru*

**S.L. Krautsou, L.V. Areshkina**

**ESTIMATION OF SOIL ORGANIC MATTER CONCENTRATION  
BY METHODS OF REMOTE SENSING OF THE EARTH**

Soil spectral properties, and existing methods of remote sensing of the Earth (RSE) estimations of soil organic matter concentration are considered. An example of estimation of soil organic matter concentration by method RSE is provided.